J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 139, p.3 ～ 12 (2018)

畑地灌漑特集
論　文
Original Paper

HYDRUS-1D を用いた砂丘未熟土畑における灌水操作方法の検討

亀山幸司[1]・岩田幸良[1]・宮本輝仁[1]・佐々木康一[2]

Optimization of irrigation regime in a sand dune soil field using HYDRUS-1D

Koji KAMEYAMA[1], Yukiyoshi IWATA[1], Teruhito MIYAMOTO[1] and Koichi SASAKI[2]

Abstract: In this study, we investigated the optimum irrigation regime for a sand dune soil field using a numerical simulation model. For this purpose, we used HYDRUS-1D to simulate the soil water regime in the root zone of an irrigated sand dune soil and evaluated the effects of irrigation scenario (matric potential threshold for irrigation and daily irrigation depth) on the cumulative irrigation amount, cumulative water discharge from the root zone, ratio of cumulative irrigation amount over potential evapotranspiration, and ratio of transpiration reduction using the triggered irrigation module in HYDRUS-1D. When a soil water characteristic parameter determined from undisturbed soil samples in the laboratory was used, volumetric water contents simulated by HYDRUS-1D differed from field measurements ($RMSE = 0.031 - 0.039$). Estimation accuracy was improved using a soil water characteristic parameter derived from an inverse analysis ($RMSE = 0.007 - 0.009$). Based on the results of scenario simulation with different matric potential thresholds for irrigation and daily irrigation depths, the matric potential threshold set at −75 cm and the daily irrigation depth of 3.2 mm are recommended to decrease transpiration reduction and water discharge from the root zone.

Key Words : irrigation regime, numerical simulation, soil water movement, triggered irrigation

1. はじめに

福井県北部に位置する三里浜砂丘地では，畑地灌漑用水として地下水を利用している．しかし，海に近いため，地下水が塩水化することで塩害や灌漑用水の不足を引き起こしている（勝田, 2007）．この対策として，国営九頭竜川下流農業水利事業の中で，農業用水の再編により新たに生み出された用水が三里浜砂丘地に供給される予定である．この水源転換による将来の安定した灌漑用水供給を想定し，三里浜砂丘地では新規導入作物の検討や灌水効果の検証，肥料の溶脱状況の検証などの営農実証試験が行われている（河原, 2013）．

[1]Institute for Rural Engineering, NARO, 2-1-6 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8609, Japan. Corresponding author: 亀山幸司, 農研機構農村工学研究部門.
[2]Regional Agriculture Division, Fukui Prefectural Government, 3-17-1 Ote, Fukui city, Fukui 910-8580, Japan.
2017 年 6 月 13 日受稿　2018 年 4 月 2 日受理

三里浜砂丘地のような砂丘未熟土の圃場に灌漑施設が整備されると，野菜やメロン，スイカ等の灌水効果が高い新規作物の導入が推奨される．これらの作物は一般に高い土壌水分状態で栽培される．例えば，砂丘地圃場でのスイカ栽培では，圧力水頭が −25 ～ −32 cm の範囲で維持されていたとの報告例がある（橋本ら, 2010）．また，井上・竹内（2000）は砂地圃場でホウレンソウを栽培するときの最適な圧力水頭の範囲は −20 ～ −30 cm であったと報告した．

高い土壌水分量を維持するためには頻繁に灌水を実施する必要があるが，これを人力で行おうとすると多大なる労力を要する．そのため，これまでに畑地灌漑の自動化が検討されてきた（例えば，井上・竹内, 2000）．灌水を自動的に行うためには，圃場で体積含水率や圧力水頭をモニタリングし，測定値がある閾値を超えたときに必要な量の灌水を行う必要がある．このような畑地灌漑の自動化は，安価な土壌水分計の普及により実用化されてきている（Blonquist et al., 2006; Vellidis et al., 2008）．

灌水を開始する際の土壌水分の閾値や灌水量，灌水時間などの灌水パラメータは栽培作物や栽培環境によって異なるため，灌水の自動化を行うためには個々の圃場条件に応じた灌水パラメータを設定する必要がある．しかし，圃場試験による灌水パラメータの取得には労力と時間を要する．そこで近年，数値解析を応用して灌水パラメータを決定する試みが始まった．これまでに土壌水分・溶質移動汎用プログラムが整備され，畝間灌漑や点滴灌漑，地中灌漑等の異なる灌水方法について，土壌水分や溶質の動態が把握された（Abbasi et al., 2004; Bastiaanssen et al., 2007; Subbaiah, 2013; El-Nesr et al., 2014）．日本においても，畑地灌漑の用水諸元の一つである日消費水量を精度良く求めるために HYDRUS が使用されている（中村ら, 2016; 弓削・阿南, 2016）．その結果，様々な灌水方法に汎用プログラムを適用する際の注意点や，数値解析を行うときの境界条件の設定方法が明らかになってきた．さらに，HYDRUS には，土層内のある深さの圧力水頭が閾値に達した時に予め設定された水量と時間によって間断灌漑を行うオプション（triggered irrigation）がある（Dabach et al., 2013）．Marković et al.（2015）は HYDRUS に組み込まれた間断灌漑オプションを使用して様々な栽培条件でシナリオ解析を行い，最適

な灌水パラメータの選定が可能となることを示した．また，Müller et al.（2016）は半乾燥地でナスを栽培する際，点滴灌漑を行うための最適な灌水パラメータを圃場実験と数値解析により求めた．しかし，三里浜砂丘地のように保水性の極端に低い砂丘未熟土において，HYDRUS を用いて灌水パラメータを決定した事例はほとんどない．

砂丘未熟土の圃場において比較的高水分状態を維持するように灌水を実施する場合，下方浸透が卓越することによる灌水の損失や肥料の溶脱が懸念される（亀山ら, 2016）．作物によって消費された水分を少量ずつ頻繁に灌水することにより根群域下端からの浸透損失を抑えられることは知られている（Hillel, 1998）．ただし，砂丘未熟土畑における少量頻繁灌水について，下方浸透を極力抑えるための灌水パラメータを検討した事例は少ない．一方，近年の研究では HYDRUS を用いて根群域下端の水フラックスを計算し，畑地灌漑計画に役立てることも検討されている（成岡ら, 2015; 岩田ら, 2016）．HYDRUS を用いて様々な灌水条件のもとで下方浸透量を計算することで，砂丘未熟土圃場における灌水の浸透損失や肥料の溶脱を抑制するような灌水パラメータの決定が可能になると考えられる．

そのため，まず，現地の砂丘未熟土畑で生産者によって慣行的に行われている土壌水分を比較的高めに維持する少量頻繁灌水の下での土壌水分動態を HYDRUS により再現する．次に，同様のモデルにより灌水パラメータを変化させたときのシナリオ解析を行い，作物の消費水量を満たしながら下方への浸透損失をできるだけ抑える灌水操作方法を検討する．

2. 調査方法

2.1 試験圃場と栽培状況

試験圃場は，三里浜砂丘地内（福井県坂井市三国町）に位置するビニールハウス温室（幅 5.5 m × 長さ 85 m（室内面積，約 5 a））である．土壌は砂丘未熟土に分類され，砂分を 90 % 以上含む砂土である（亀山ら, 2016）．この温室において，新規導入作物の検討のための実証試験が実施され，前々作にメロン，前作にコカブが栽培された．

前作終了後，作土をロータリーにより耕耘した．2014 年 10 月 17 日に基肥として化成肥料（日の本化成 3 号）を約 0.1 kg m^{-2} 散布した後，コカブを播種した．コカブの列間は約 20 cm であり，株間は約 10 cm であった．栽培期間中，ビニールハウスの左右に固定された片側噴霧式の灌水ホースで散水灌漑を行った．なお，その時の地表面の水分状態に基づいて栽培農家が適宜判断し，灌水を行うタイミングや灌水量を決定した．播種から 50 日目以降，出荷可能な大きさ（直径が 5 cm 程度）に育った株から順に収穫が行われた．コカブの栽培期間は, 2014 年 10 月 19 日 ～ 2015 年 1 月 12 日であった．

2.2 土壌の物理性の測定

試験に先立って同ハウス内に深さ 100 cm 程度の試坑を掘り，土壌断面調査を実施し，深さ 100 cm までは砂土であることや地下水面がないことを確認した．この際，地表面から 7.5 cm，22.5 cm，45 cm の深さにおいて 100 cm^3 の円筒試料を 3 点ずつ採取し，これらの試料の飽和透水係数および水分特性曲線を測定した．飽和透水係数は定水位法により測定した．また，水分特性曲線は，−31.6 cm（pF 1.5）以上では砂柱法，−31.6 cm ～ −15,800 cm（pF 1.5 ～ 4.2）では加圧板法により測定した．各土層の水分特性曲線の測定結果に van Genuchten-Mualem モデルを適合させるため，非線形回帰プログラムの RETC（PC-Progress s.r.o.; van Genuchten et al., 1991）を用いた．

室内試験により得られた水分特性曲線を Fig. 1 に示し，水分特性曲線から得られた van Genuchten-Mualem モデルパラメータを Table 1 に示した．また，室内試験により測定された飽和透水係数も Table 1 に示した．水分特性曲線については深さによる大きな変動は見られなかったが，飽和透水係数については深さによる変動が見られた．

2.3 土壌水分量 · 灌水量 · 気象要素の測定

栽培期間中の土層内の土壌水分量，ハウス内の灌水量，日射量および温湿度を測定した．播種後の 2014 年 10 月 21 日に，深さ 7.5 cm，15 cm，22.5 cm に土壌水分センサー（Decagon 5TE）を設置した．センサーの設置深さは，コカブの貯蔵根長（15 cm 程度）を考慮して決定した．なお，試坑を掘った後，試坑の鉛直断面に対して水平方向に各センサーの回路部を含む全体を挿入した．また，土壌水分センサーは 3 本のロッドが鉛直方向に並ぶように断面に挿入した．土壌水分センサーの設置場所は，ハウスの側面から 1 m 程度離れたコカブの列間の中央である．土壌水分量の測定は，ハウス内の 2 地点で実施した．土壌水分センサーの出力値は，試験圃場から採取した土壌を用いて実験室で求められた校正式により体積含水率に変換した（亀山ら, 2016）．灌水量は，ハウスの側面から 1 m 程度離れた位置に雨量計（Decagon ECRN-100）を設置して測定した．コカブが成熟した際にも葉が雨量計の測定を邪魔しないように，雨量計の開口部が地表面から 30 cm 高い位置になるように設置した．また，全天日射計（Decagon PYR）および温湿度センサー（Decagon VP-3）は，ハウス内において側面から

Table 1 室内試験により測定された水分特性曲線から得られた van Genuchten-Mualem モデル（(2) 式）パラメータ（θ_r, θ_s, α_{VG}, n）及び飽和透水係数（K_s）測定値.
van Genuchten-Mualem model (equation (2)) parameter (θ_r, θ_s, α_{VG}, n) determined from soil water characteristic curves and saturated hydraulic conductivity (K_s) measured from undisturbed soil samples in the laboratory.

Depth (cm)	θ_r (m^3 m^{-3})	θ_s (m^3 m^{-3})	α_{VG} (cm^{-1})	n	K_s (cm d^{-1})
7.5	0.07	0.44	0.06	3.57	2,012
22.5	0.07	0.44	0.07	3.50	1,524
45	0.06	0.43	0.07	3.39	2,586

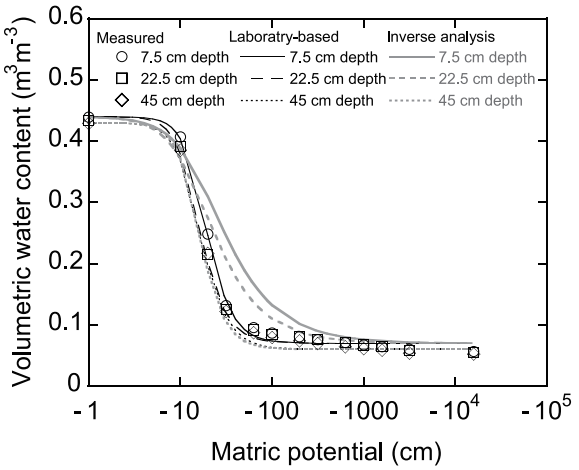


Fig. 1　室内試験と逆解析から得られた水分特性曲線.
Soil water retention curves obtained from laboratory experiments and inverse analysis.

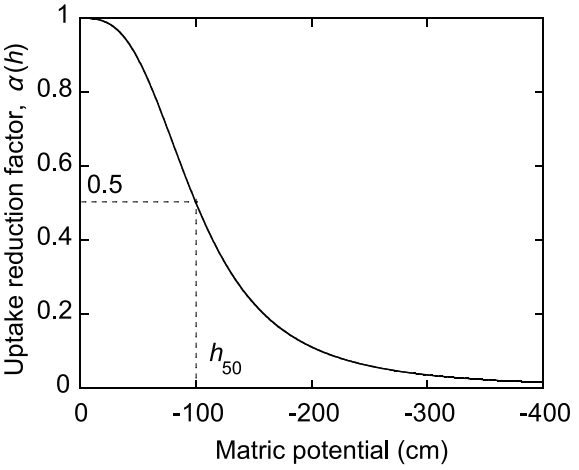


Fig. 2　圧力水頭と根の吸水抑制の関係を表す S-shape モデル（(6) 式）（図中の h_{50} は，根の吸水速度が可能蒸散速度の 50 % に抑制される時の圧力水頭を示す）.
Plot of the S-shaped function（equation（6））for describing root water uptake reduction with different matric potential. h_{50} represents a matric potential at which the root water uptake rate is reduced by 50 % from the potential rate.

0.5 m 程度離し，高さ 1 m の位置に設置した．全ての測定データを，30 分間隔でロガー（Decagon Em50b）に記録した.

3. 数値解析方法

3.1 土壌水分移動に関する支配方程式

試験圃場では，畝などの顕著な凹凸はなく，散水灌漑により土壌面への水分補給が空間的に一様に行なわれていたため，土壌水分動態の数値解析を HYDRUS-1D ver. 4.16.0110（Šimůnek et al., 2015）を用いて行った．HYDRUS-1D では土層内の鉛直 1 次元の土壌水分移動が次式により計算される.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(K(h)\frac{\partial h}{\partial z}+K(h)\right)-S(h) \tag{1}$$

ここで，θ：体積含水率（$m^3\ m^{-3}$），t：時間（d），z：鉛直深さ（cm），h：圧力水頭（cm），$K(h)$：不飽和透水係数（$cm\ d^{-1}$），$S(h)$：根の吸水速度（d^{-1}）である.

不飽和透水係数および水分特性曲線は van Genuchten-Mualem モデル（van Genuchten, 1980）により近似した.

$$\theta=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{[1+|\alpha_{VG}h|^n]^m} \tag{2}$$

$$K(h)=K_sS_e^{\ l}\left[1-\left(1-S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \tag{3}$$

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} \tag{4}$$

ここで，θ_r：残存体積含水率（$m^3\ m^{-3}$），θ_s：飽和体積含水率（$m^3\ m^{-3}$），α_{VG}，n，$m=1-1/n$：曲線形状パラメータ，K_s：飽和透水係数（$cm\ d^{-1}$），S_e：有効水分飽和度（–），l：間隙結合係数（0.5）である.

3.2 根の吸水速度と可能蒸発散速度の設定

（1）式中の根の吸水速度 $S(h)$ は次式により計算される.

$$S(h)=\alpha(h)\beta(z)T_p \tag{5}$$

ここで，T_p は可能蒸散速度（$cm\ d^{-1}$），$\alpha(h)$ は吸水速度の制限因子となる圧力水頭による水ストレス応答関数，$\beta(z)$ は正規化された根密度分布（cm^{-1}）であり，根群域を深さ方向に積分すると 1 になる.

HYDRUS-1D では，(5) 式中の水ストレス応答関数 $\alpha(h)$ として Feddes モデル（Feddes et al., 1978）と S-shape モデル（van Genuchten, 1987）を選択することができる．ここでは，少ないパラメータ数で $\alpha(h)$ が計算できる S-shape モデルを用いた（Fig. 2）.

$$\alpha(h)=\frac{1}{1+\left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p} \tag{6}$$

ここで，h_{50} は根の吸水速度が可能蒸散速度の 50 % に抑制される時の圧力水頭（cm）であり，p は曲線形状パラメータである.

（5）式中の T_p は可能蒸発散速度（ET_p）をもとに与えられる．そこで，ハウス内の日射量，日最高気温，日最低気温，平均相対湿度の測定値を用い，Penman-Monteith 式（Allen et al., 1998）により ET_p を算定した．その際に必要となるハウス内の日平均風速は，農林水産省農村振興局（2016）に倣い，屋外の日平均風速の 15 % と仮定した．なお，屋外の風速データとして圃場から直線距離で約 5 km の位置にある三国観測所の観測値を援用した．算定された ET_p を，葉面積指数（LAI）をもとに次式により可能蒸発速度（E_p，$cm\ d^{-1}$）と T_p に配分した.

$$E_p=ET_p\exp(-k\times LAI) \tag{7}$$

$$T_p = ET_p\,[1-\exp(-k\times LAI)] \tag{8}$$

ここで，k は作物群落による放射の減衰に関わる係数であり，デフォルト値である 0.463（Šimůnek et al., 2015）を用いた．

3.3 計算領域および初期・境界条件

土壌断面調査により，100 cm 深さまでは砂土であることが確認されたため，計算領域として深さ 100 cm の土層を設定した．土壌断面調査では，水分特性曲線については深さによる大きな変動は見られなかったが（Fig. 1），飽和透水係数については深さによる変動が見られた（Table 1）．このため，3 層の成層を仮定し，地表面から深さ 15 cm までを第 1 層，深さ 15 cm から 30 cm までを第 2 層，30 cm 以深を第 3 層とした．また，計算期間は，土壌水分センサーを設置した翌日の 2014 年 10 月 22 日から栽培期間最終日の 2015 年 1 月 12 日までとした．

計算対象期間の最初にあたる 2014 年 10 月 22 日 0 時の時点における体積含水率の測定値は，深さ 7.5 cm で 0.154 $m^3\ m^{-3}$，深さ 15 cm で 0.147 $m^3\ m^{-3}$，深さ 22.5 cm で 0.146 $m^3\ m^{-3}$ であり（いずれも 2 地点の測定値の平均），深さ方向に大きな違いは見られなかった．そこで，深さ 100 cm までの全層の初期体積含水率を一定とし，初期条件として 0.15 $m^3\ m^{-3}$ を与えた．上部境界条件は大気境界条件とした．また，竹内・長江（1990）による三里浜砂丘地での測定事例によれば，地下水位は 4.5 m 程度であったと報告されている．砂土では一般に毛管上昇が生じにくく，毛管水帯が浅い．このため，地下水面が深さ 100 cm 付近の水移動に与える影響は極めて小さいと考えられたため，下部境界条件は自由排水条件とした．

3.4 水分特性曲線パラメータの設定

各土層の水分特性曲線の測定結果に RETC を適用して推定した van Genuchten-Mualem モデルのパラメータ（Table 1）を用いて数値解析を行った．計算結果と体積含水率の実測値を比較し，大きな乖離が見られる場合は，逆解析による van Genuchten-Mualem モデルのパラメータの最適化を先のパラメータを初期値として実施した．逆解析を行う際，体積含水率の実測値と計算値の Root mean square error（*RMSE*）ができる限り小さくなるように最適化を行った．

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(X_i - x_i)^2}{n}} \tag{9}$$

ここで，X_i は実測値，x_i は計算値，n はデータ数を示す．なお，逆解析のための実測値として，深さ 7.5，15，22.5 cm の体積含水率の日平均値（2 地点の測定値の平均）を与えた．

3.5 根の吸水に係るパラメータの設定

現地圃場ではコカブの貯蔵根および側根は深さ約 15 cm 以内に観察された．そこで，根は深さ 15 cm までに均一に分布していると仮定し，根の吸水割合を表す（5）式の $\beta(z)$ を地表面から深さ 15 cm で同じ値（1/15）に設定した．

既存の研究では，根の給水に係る S-shape モデル（（6）式）のパラメータの h_{50} は $-100 \sim -5{,}000$ cm，p は 2 ～ 3 が用いられている（Dabach et al., 2013; Dabach et al., 2015; Müller et al., 2016; Segal et al., 2006; Skaggs et al., 2006）．砂土の水分保持は毛管水領域で急激に低下し，それ以下の領域では殆どゼロとなる．このため，Skaggs et al.（2006）が指摘しているように，砂土の h_{50} は一般に大きくなることが考えられる．現地土壌の水分特性を見たとき，各層共に −10 cm から水分が急激に低下し，−100 cm 以下では殆ど水分が保持されていないことが確認され（Fig. 1），−100 cm 以下では根の吸水がかなり抑制されると考えられる．そこで，今回の計算では $h_{50} = -100$ cm，$p = 3$ を用いた．なお，同様のパラメータが砂質土における観葉植物栽培に対して適用されている（Segal et al., 2006）．これらのパラメータを用いる場合，−20 cm 以下から吸水抑制が始まり，−160 cm 以下では 80 % 以上吸水が抑制される計算となる（Fig. 2）．

3.6 蒸発散量推定に係るパラメータの設定

可能蒸発散量を推定するため，コカブの葉面積指数（*LAI*）は以下のように設定した．収穫期（播種から 50 日目）における 1 株あたりのコカブの葉面積は大和ら（1992）を参考に 0.05 m^2 と仮定した．植栽密度（列間 20 cm，株間 10 cm）から 1 m^2 あたりの株数を 50 本と仮定すると，収穫期における 1 m^2 あたりの *LAI* は 2.5 となる．それ以降は，出荷可能な大きさになった株から順に収穫されるため，*LAI* は減少する．このため，播種日の *LAI* は 0，播種後 50 日目の *LAI* は 2.5，栽培期間終了日（2015 年 1 月 12 日）の *LAI* は 0 と仮定し，その間の期間については線形補間した *LAI* を使用して，蒸発速度と蒸散速度の割合を計算した．

4. 現地調査結果と土壌水分動態の再現性の検討

4.1 現地調査結果

栽培期間中の日灌水量，日射量，最高・最低温度，相対湿度，可能蒸発量，可能蒸散量，可能蒸発散量を Fig. 3 に示す．栽培初期から 11 月までは頻繁に灌水が行われたが，地上部の生長が止まる 12 月以降はあまり灌水が行われなかった（Fig. 3（a））．頻繁に灌水が行われた 10 月 22 日から 11 月 30 日までの積算灌水量は 41.8 mm であり，日灌水量は 0.2 ～ 5.4 mm d^{-1}（平均 1.7 mm d^{-1}）と日によって大きく異なった．また，灌水の間隔は 0 ～ 3 日と不規則であった．日射量や気温の変動（Figs. 3（b），（c））によって農家が灌水のタイミングを変えたことが，日灌水量や灌水間隔に影響を与えたと考えられる．

10 月と 11 月の平均日射量は 16.6 MJ $m^{-2}\ d^{-1}$ と値が大きく，ハウス内の日最高気温も平均 26.4 °C と高い傾向があったが，12 月以降は平均日射量が 8.5 MJ $m^{-2}\ d^{-1}$

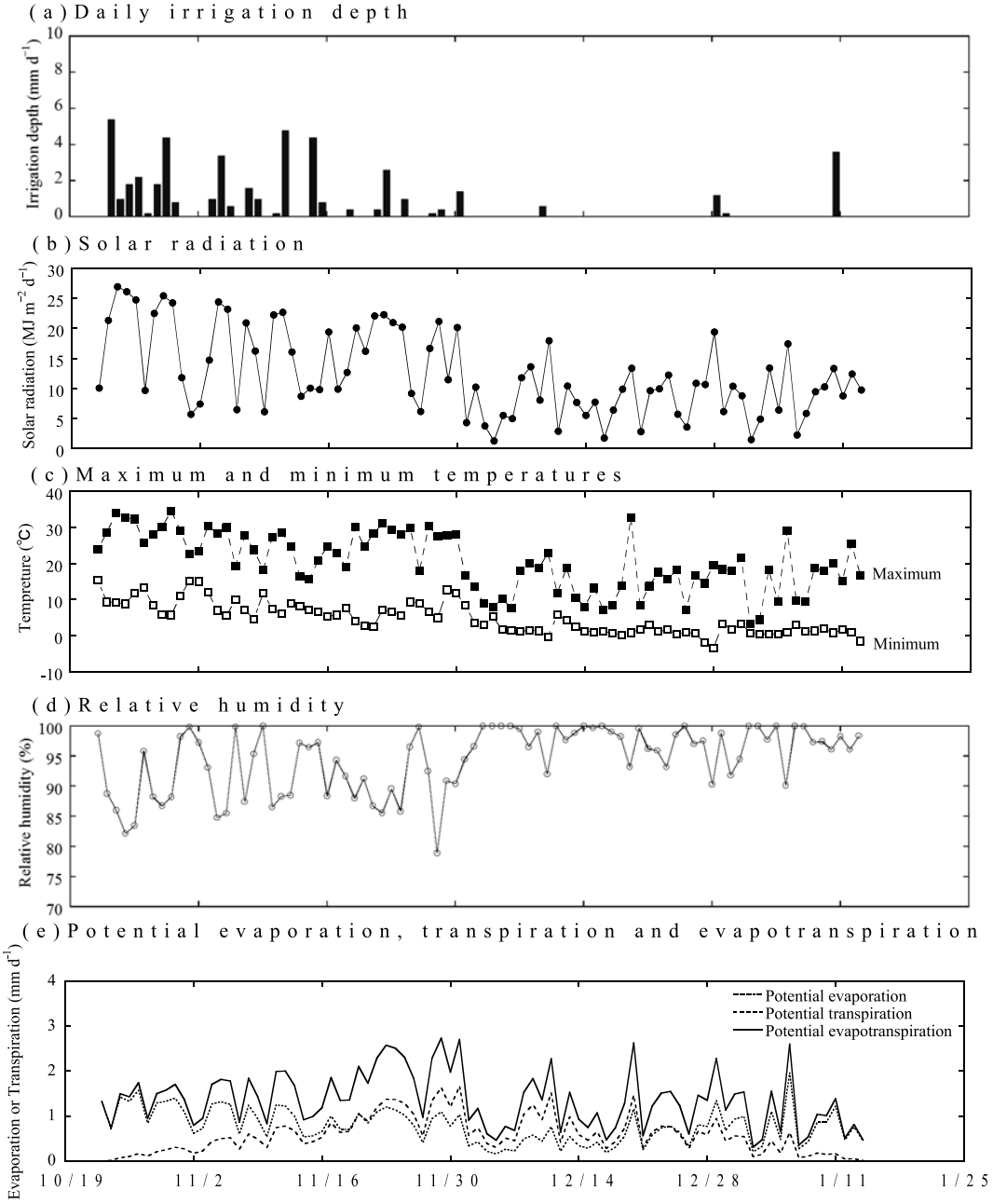


Fig. 3　試験圃場の（a）日灌水量，（b）日射量，（c）最高・最低温度，（d）相対湿度の測定値および（e）可能蒸発量，可能蒸散量，可能蒸発散量の推定値.
(a) Daily irrigation depth, (b) solar radiation, (c) maximum and minimum temperatures, (d) relative humidity and (e) estimated potential evaporation, transpiration and evapotranspiration in an experimental field.

と減少し，ハウス内の日最高気温も平均 14.9 °C と低下した（Figs. 3（b），(c)）.

11 月までの ET_P は 0.7 ～ 2.7 mm d^{-1}（平均 1.6 mm d^{-1}）であったが（Fig. 3（e)），11 月までは頻繁に灌水が行われていたため（Fig. 3（a)），土壌の体積含水率は全ての深さで 0.12 ～ 0.17 m^3 m^{-3} で推移していた（Figs. 4（a)，(b)，(c)）．水分特性曲線（Fig. 1）から圧力水頭は −100 cm（pF 2.0）よりも湿潤側に相当する水分状態であったと判断されることから，圃場容水量よりも多い水分状態であったと推察される．12 月以降は灌水が殆ど行われず，ET_P は 0.3 ～ 2.6 mm d^{-1}（平均 1.1 mm d^{-1}）と蒸発散が無視できなかった（Fig. 3（e)）．そのため，全ての深さで体積含水率は緩やかに減少した（Figs. 4（a)，(b)，(c)）.

4.2 土壌水分動態の再現性

室内実験により決定された水分特性曲線パラメータを用いて計算した体積含水率と実測値との比較を Fig. 4 に示した．室内実験から得られた水分特性曲線パラメータを用いた場合，計算値と実測値は乖離しており（$RMSE$ = 0.031 ～ 0.039），土壌水分量の変化幅も大きく異なった（Figs. 4（a)，(b)，(c)）．特に灌水により体積含水率が高い状況にあった栽培初期から 11 月にかけて計算値が低くなった.

原因を探索するため，蒸発散量のない条件で計算したが，計算結果は大きく変わらず，$RMSE$ は殆ど変わらなかった．このため，蒸発散量の推定誤差が 11 月までの

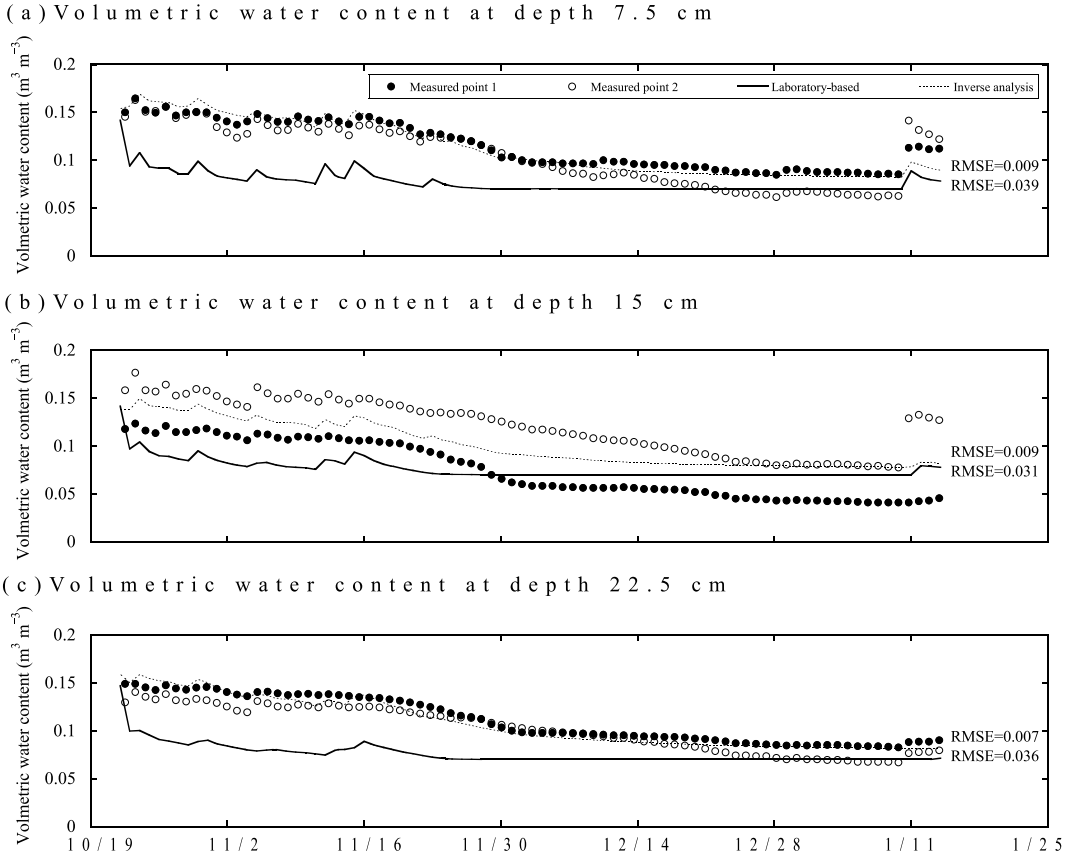


Fig. 4 室内パラメータと逆解析パラメータを用いた場合の体積含水率の計算値ならびに 2 地点の測定値の経時変化（a）深さ 7.5 cm，（b）深さ 15 cm，（b）深さ 22.5 cm.
Time series of simulated volumetric water contents and measured volumetric water contents at two measurement positions. Simulated values were calculated using HYDRUS-1D with soil water characteristic parameter obtained from laboratory data (solid line) and inverse analysis (dashed line). (a) depth 7.5 cm, (b) depth 15 cm and (c) depth 22.5 cm.

実測値と計算値の違いの原因ではないと考えられた．さらに，初期条件の影響についても検討したが，初期体積含水率を変化させても同様に計算結果への影響は殆ど見られなかった．そのため，室内試験による水分特性曲線パラメータが実際の試験圃場の水分特性曲線を十分に反映していないことが，体積含水率の計算結果が測定結果と乖離する主要因であると判断した．室内実験による水分特性曲線パラメータは迅速かつ正確に得ることが可能である一方，圃場条件における水分特性曲線の代表値とならない場合もあることが指摘されている（例えば，Sonnleitner et al., 2003; 中村ら, 2016）．

逆解析では，推定するパラメータをできる限り減らすことが推奨されている（Rassam et al., 2004）．これまでに報告されている砂土の水分特性曲線（例えば，Nakamura et al., 2004; 坂井・取出, 2007; 藤巻ら, 2012）を比較したところ，曲線勾配は幅を持つことが明らかとなった．そこで，van Genuchten-Mualem モデルのパラメータのうち曲線勾配に関わる n を推定パラメータとして，体積含水率の実測値と計算値の *RMSE* ができる限り小さくなるように逆解析を行った．

推定パラメータを用いることにより *RMSE* は 0.007 ～ 0.009 となり，計算結果は大きく改善された（Figs.4（a），（b），（c））．逆解析から得られた n は 1.99（0 – 15 cm），2.14（15 – 30 cm），3.63（30 cm 以深）であった．その結果を Fig. 1 に示すと，表層ほど推定値は実測値から外れ，推定された水分特性曲線は実測した曲線よりも勾配が緩やかであることがわかる．現地の土壌水分動態を再現するためには，表層における重力排水後の土壌水分量が 0.15 m^3 m^{-3} 程度となるよう水分特性曲線を修正する必要があった．この要因として現地土壌の不均一性に加え，採取試料と現地土壌で土壌構造や水分分布，封入空気量等が異なったこと（中村ら, 2016）が考えられる．

5. シナリオ解析による灌水操作方法の検討

5.1 灌水パラメータの設定

コカブの栽培期間のうち，頻繁に灌水が行われた栽培初期の 10 月 22 日から 11 月 30 日までを対象に，作物の消費水量を満たしながら下方への浸透損失をできるだけ抑える灌水操作方法を検討した．HYDRUS-1D に組み込まれた間断灌漑オプションを使用すると，灌水を開始する際の圧力水頭の閾値とそれを設定する深さ，および 1 回あたりの灌水量（灌水強度と 1 回あたりの灌水時間）を設定して土壌水分動態の数値解析ができる．本研究では，間断灌漑オプションを用いたシナリオ解析により，灌水を開始する際の圧力水頭の閾値や日灌水量を変

化させた場合，計算を実施した期間である 40 日間の積算灌水量や深さ 100 cm における積算下方浸透量がどのように変化するかを評価した．

灌水を開始する際の圧力水頭の閾値は −250，−200，−150，−100，−75，−50，−25 cm とした．これらの値は，黒ボク土圃場のコカブ栽培では圧力水頭 −100 ～ −1,000 cm（pF 2 ～ 3）を目安に灌水を行っているとする報告（高野・猪野, 2008）や，砂土圃場では比較的高水分で灌水管理されていることが多いとする報告（井上・竹内, 2000; 橋本ら, 2010）を参考に設定した．圧力水頭の閾値を設定する深さは根群域（15 cm）の中心の 7.5 cm とした．

現地の日灌水量と ET_p（Fig. 3）を参考に，シナリオ解析で用いる日灌水量を設定した．現地調査結果から，10 月 22 日から 11 月 30 日までの日灌水量は 0.2 ～ 5.4 mm d^{-1}（平均 1.7 mm d^{-1}）であり，ET_p は 0.7 ～ 2.7 mm d^{-1}（平均 1.6 mm d^{-1}）であった．このため，シナリオ解析で用いる日灌水量は 1.6（$1 \times ET_\mathrm{p}$），2.4（$1.5 \times ET_\mathrm{p}$），3.2（$2 \times ET_\mathrm{p}$），4.8（$3 \times ET_\mathrm{p}$）mm とした．また，その際の灌水強度は，現地データを参考に 10 cm d^{-1} とした．現場では灌水間隔が 1 日以上だったことから，灌水開始から 24 時間経過までは灌水を実施せず，これ以降で深さ 7.5 cm の圧力水頭が上記の閾値よりも低下した時点で灌水を実施する設定にした．灌水量は，灌水時間を変化させることで調整した．

初期条件は，現地の土壌水分動態を再現する数値解析と同様に，深さ 100 cm までの全層の体積含水率を 0.15 $\mathrm{m}^3\ \mathrm{m}^{-3}$ とし，上部境界条件は大気境界条件，下部境界条件は自由排水条件とした．

数値解析結果をもとに，積算 ET_P に対する積算灌水量の割合（$I \cdot ET_\mathrm{P}^{-1}$）と，積算 T_P に対する積算 T_P と根による積算吸水量の差の割合（蒸散抑制率）を算定し，灌水操作の結果の評価指標とした．$I \cdot ET_\mathrm{P}^{-1}$ は可能蒸発散量に対する灌水量の割合であることから，作物の消費水量に対する灌水量の妥当性を評価できる．一般に，塩類集積を発現させないためにも灌水量は蒸発散量よりも僅かに多いことが望ましいとされている（Dabach et al., 2013）．蒸散抑制率は，土壌水分低下によって生じる根の吸水抑制割合を表しており，蒸散抑制率が大きくなると収量低下が懸念される（例えば，Segal et al., 2006）．

5.2 試験圃場における灌水操作の最適化

灌水を開始する際の圧力水頭の閾値や日灌水量を変化させた場合の積算灌水量，下端（深さ 100 cm）からの積算流出量，$I \cdot ET_\mathrm{P}^{-1}$，蒸散抑制率を Fig. 5 に示す．

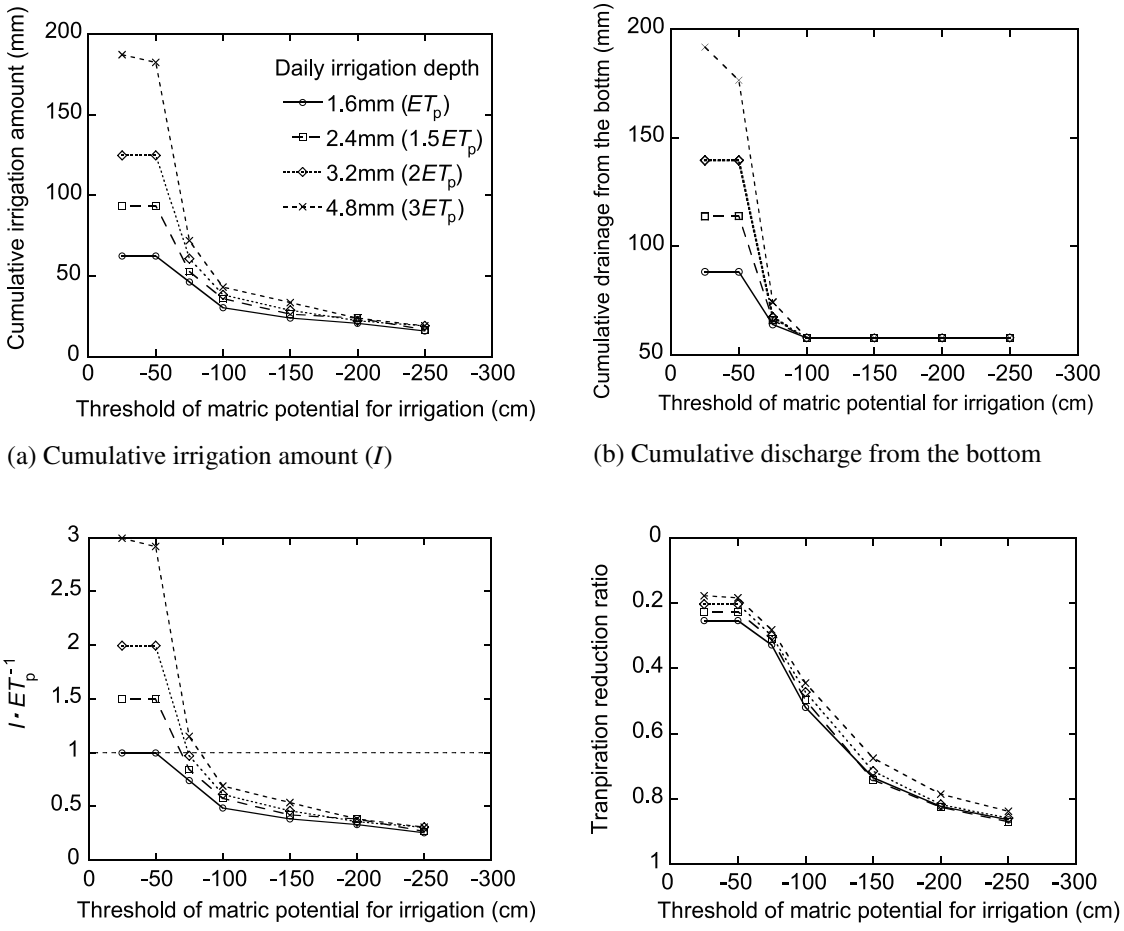
灌水を開始する際の圧力水頭の閾値が高くなるにつれて，積算灌水量も増加する（Fig. 5（a））．また，日灌水量が多いほど積算灌水量も多くなることもわかる．灌水を開始する際の圧力水頭の閾値が −50 cm 以上では，日灌水量によらず，積算灌水量がほぼ頭打ち状態となった．これは灌水を行っても設定した圧力水頭まで回復しないまま，設定した量の灌水が連日行われたためと考えられる．砂丘未熟土では灌水を開始する際の圧力水頭の閾値を高く設定した場合，不飽和透水係数も高くなり，灌水の大部分が深部に浸透しやすい土層条件が形成されてしまうことが要因として考えられる．

灌水を開始する際の圧力水頭の閾値と積算流出量の関係をみると，閾値が −100 cm 以下では，日灌水量に依らずほぼ一定の積算流出量となった．これに対して，閾値が −100 cm 以上になると下端からの浸透損失量が増えはじめ，−50 cm 以上で積算流出量もほぼ頭打ち状態となった（Fig. 5（b））．しかし，日灌水量が 4.8 mm のときは閾値を高くすると積算流出量も増加した．Fig. 5（a）と Fig. 5（b）を合わせてみると，閾値が −100 cm 以上のときには，灌水量が増加すると積算流出量も灌水量の増加分とほぼ同じ量だけ増加することから，灌水のほとんどは作物に有効利用されないと考えられる．このように土層を高水分状態に管理しようとすると，深部への浸透水量も増加する．そのため，作物の吸水を阻害しない程度に灌水を開始する際の圧力水頭の閾値を下げて灌水を実施することが，下方への浸透損失を抑制するためには望ましいと考えられる．

灌水を開始する際の圧力水頭の閾値および日灌水量と $I \cdot ET_\mathrm{P}^{-1}$ の関係から（Fig. 5（c）），閾値が −50 cm 以上かつ日灌水量が 2.4 mm 以上の場合，$I \cdot ET_\mathrm{P}^{-1}$ は 1.5 以上の過剰灌水となり（Fig. 5（c）），浸透損失量が増加する可能性が示された（Fig. 5（b））．灌水を開始する際の圧力水頭の閾値が −100 cm 以下の場合には，$I \cdot ET_\mathrm{P}^{-1}$ は 1 以下で灌水不足となる（Fig. 5（c））．$I \cdot ET_\mathrm{P}^{-1}$ が 1 となる圧力水頭の閾値をグラフから求めると，日灌水量が 1.6 mm，2.4 mm，3.2 mm，4.8 mm のとき，それぞれ −50 cm，−65 cm，−75 cm，−85 cm であった．灌水を開始する際の圧力水頭の閾値を下げて日灌水量を増やすことにより，I と ET_P のバランスがとられることがわかる．

灌水を開始する際の圧力水頭の閾値および日灌水量と蒸散抑制率の関係（Fig. 5（d））から，閾値が −50 cm 以上の場合は蒸散抑制率が低く，−75 cm 以下の場合は閾値の低下に伴って蒸散抑制率が上昇する結果となった．また，閾値が −50 cm 以上の場合は日灌水量が多いほど蒸散抑制率が低下する傾向が見られた．閾値が −75 cm 以下では日灌水量が 1.6 ～ 3.2 mm の場合は同様の蒸散抑制率を示し，日灌水量が 4.8 mm では他の日灌水量の場合よりも蒸散抑制率が 2 ～ 7 % 低くなる傾向が見られた．水ストレス応答関数（Fig. 2）を反映して，閾値が −100 cm の時の蒸散抑制率が約 0.5，−160 cm の時の蒸散抑制率が約 0.8 と計算された．今回の計算では，水分特性曲線を考慮して（Fig. 1），水ストレス応答関数が設定されている．しかし，灌水パラメータと蒸散抑制率の関係を今後より詳細に検討するためには，圧力水頭と作物根による吸水抑制との関係を実験的に確認することも重要と考えられる．

砂丘未熟土においては，灌水を開始する際の圧力水頭の閾値を −50 cm 以上に設定した場合，土壌水分量が高く（Fig. 1），灌水の大部分が深部に浸透しやすくなることが示唆された（Fig. 5（b））．一方，閾値を −100 cm 以下に設定した場合，土壌水分量が極端に小さくなり（Fig.



(a) Cumulative irrigation amount (I)

(b) Cumulative discharge from the bottom

(c) Ratio of cumulative irrigation amount over potential evapotranspiration ($I \times ET_P{}^{-1}$)

(d) Transpiration reduction ratio

Fig. 5 日灌水量と灌水を開始する際の圧力水頭の閾値を変化させた場合の（a）積算灌水量（I），（b）下端（100 cm）からの積算流出量，（c）可能蒸発散量に対する積算灌水量の割合（$I \times ET_P{}^{-1}$），（d）蒸散抑制率の計算結果.
(a) Cumulative irrigation amount (I), (b) Cumulative discharge from the bottom, (c) Ratio of cumulative irrigation amount over potential evapotranspiration ($I \times ET_P{}^{-1}$), and (d) Transpiration reduction ratio, simulated by HYDRUS-1D with different daily irrigation depths and thresholds of matric potential for irrigation.

1），作物根による水分吸収が抑制されるようになると推定された（Fig. 5（d））．この結果は，砂丘未熟土の畑においては，粗孔隙が多いことに由来する特殊な水分特性曲線により，灌水を開始する際の圧力水頭の閾値の最適範囲が狭くなる可能性を示唆している．

Fig. 5（c）から，$I \cdot ET_P{}^{-1} = 1$ を満たすような日灌水量と圧力水頭の閾値組み合わせは 1.6 mm と −50 cm，2.4 mm と −65 cm，3.2 mm と −75 cm，4.8 mm と −85 cm と判断された．Fig. 5（d）に示したように，これらの組み合わせではいずれも蒸散が抑制されるが，閾値が −75 cm の場合，日灌水量が 3.2 mm 以下では灌水量の増加分が積算流出量の増加に寄与する割合が小さい（Fig. 5（a），(b)）．そのため，10 月から 11 月の期間のコカブ栽培では，深さ 7.5 cm における灌水を開始する際の圧力水頭の閾値を −75 cm，日灌水量 3.2 mm に設定することにより，消費水量と灌水量のバランスが良く（Fig. 5（c））, 作物根の吸水抑制が少なく（Fig. 5（d））, 浸透損失をできるだけ抑えた（Fig. 5（b））灌水を行うことができると判断した．灌水を開始する際の圧力水頭の閾値がこれまで砂丘畑で報告されているものより低い値となった原因として，今回の栽培期間における ET_P が夏場に比べて少ないことがあげられる．Dabach et al.（2013）も ET_P の増加に伴い灌水を開始する際の圧力水頭の閾値が高くなることを数値解析結果から示している．

6. おわりに

砂丘未熟土畑において作物の消費水量を満たしながら下方への浸透損失をできるだけ抑える灌水操作方法を検討するため，HYDRUS-1D により灌水制御下の根群域の土壌水分動態予測を行うと共に，灌水を開始する際の圧力水頭の閾値と日灌水量を変えてシナリオ解析を行った．

室内実験から得られた水分特性曲線パラメータを用いて HYDRUS-1D により計算した体積含水率は，現地圃場の体積含水率の実測値と乖離が見られ，室内試験による水分特性曲線パラメータが実際の圃場の特性を十分に反映していないことが明らかになった．そこで，逆解析

により水分特性曲線パラメータを最適化し，これを用いて HYDRUS-1D により計算した結果，体積含水率の推定精度は大幅に改善された．

灌水を開始する際の圧力水頭の閾値と日灌水量を変化させた場合の計算結果から，砂丘未熟土においては，灌水を開始する際の圧力水頭の閾値を −50 cm 以上に設定した場合，灌水の大部分が深部に浸透しやすいことが示唆された．一方，同一の条件で閾値を −100 cm 以下に設定した場合では，作物根による水分吸収が抑制されるようになると推定された．この結果は，砂丘未熟土の畑では，粗孔隙が多いことに由来する特殊な水分特性曲線により，灌水を開始する際の圧力水頭の閾値の最適範囲が狭くなることを示唆している．計算結果をまとめると，10 月から 1 月にかけて行われるコカブのハウス栽培では，灌水を開始する際の圧力水頭の閾値を −75 cm，日灌水量 3.2 mm に設定することにより，$I \cdot ET_{\mathrm{P}}^{-1}$ は約 1 となり，作物根の吸水抑制や下方への浸透損失も少なくできると判断された．このように，具体的な営農条件を設定してシナリオ解析を行うことによって灌水パラメータが定量化されることで，節水かつ安定した作物収量を確保するための水管理計画の策定が可能となると考えられる．

謝辞

福井県坂井市農家の川合芳彦氏には，実証試験のための圃場をお借りした上，圃場管理等でご尽力いただきました．また，実証試験の実施に当たっては，北陸農政局九頭竜川下流農業水利事業所にご協力・ご助言をいただきました．ここに記して感謝申し上げます．

引用文献

Abbasi, F., Feyen, J. and van Genuchten, M.Th. (2004): Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: Model calibration and validation. Journal of Hydrology, 290: 63–79.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Bastiaanssen, W.G.M., Allen, R.G., Droogers, P., D'Urso, G. and Steduto, P. (2007): Twenty-five years modeling irrigated and drained soils: State of the art. Agricultural Water Management, 92: 111–125.

Blonquist Jr., J.M., Jones, S.B. and Robinson, D.A. (2006): Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor. Agricultural Water Management, 84: 153–165.

Dabach, S., Lazarovitch, N., Šimůnek, J. and Shani, U. (2013): Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. Irrigation Science, 31: 27–36.

Dabach, S., Shani, U. and Lazarovitch, N. (2015): Optimal tensiometer placement for high-frequency subsurface drip irrigation management in heterogeneous soils. Agricultural Water Management, 152: 91–98.

El-Nesr, M.N., Alazba, A.A. and Šimůnek, J. (2014): HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. Irrigation Science, 32: 111–125.

Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and Zarandny (1978): Simulation of field water use and crop yield. John Wily & Sons, New York, NY.

藤巻晴行, 布和, 天野貴久, 井上光弘 (2012): 砂丘砂における地中点滴灌漑下の水分溶質移動の数値解析. 日本砂丘学会誌, 59: 1–10.

橋本岩夫, 千家正昭, 伊藤健吾, 丸山利輔 (2010): 砂丘地露地畑のスイカ栽培における栽培管理用水の実態. 農業農村工学会論文集, 78: 289–303.

Hillel, D. (1998): Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego, CA.

井上光弘, 竹内芳親 (2000): 土壌水分制御によるハウス内の砂ベッドおよび砂地野菜栽培 — 感圧センサーの開発とその適用 —. 農業および園芸, 75: 600–606.

岩田幸良, 成岡道男, 宮本輝仁, 中村俊治, 松宮正和, 亀山幸司 (2016): 水フラックスの計算による有効土層深決定方法の検討: — HYDRUS を用いた数値シミュレーションによる新しい手法の提案 —. 農業農村工学会論文集, 84: I_175–I_183.

亀山幸司, 岩田幸良, 佐々木康一, 成岡道男, 宮本輝仁 (2016): 樹皮由来バイオ炭の砂丘地圃場への施用による土壌の保水性・保肥性改善効果. 農業農村工学会論文集, 84: I_65–I_74.

勝田英郎 (2007): 福井県三里浜砂丘砂の開発と農業. 日本砂丘学会誌, 54: 79–83.

河原あゆみ (2013): 九頭竜川下流地区における畑作農業振興の取組. 畑地農業, 659: 2–8.

Marković, M., Filipović, V., Legović, T., Josipović, M. and Tadić, V. (2015): Evaluation of different soil water potential by field capacity threshold in combination with a triggered irrigation module. Soil and Water Research, 10: 164–171.

Müller, T., Ranquet Bouleau, C. and Perona, P. (2016): Optimizing drip irrigation for eggplant crops in semi-arid zones using evolving thresholds. Agricultural Water Management, 177: 54–65.

Nakamura, K., Harter, T., Hirono, Y., Horino, H. and Mitsuno, T. (2004): Assessment of root zone nitrogen leaching as affected by irrigation and nutrient management practices. Vadose Zone Journal, 3: 1353–1366.

中村公人, 大串祥子, 池浦康広, 田中宣多 (2016): 畑地用水計画のための HYDRUS-1D を用いた土壌水分移動解析における土壌水分特性パラメータの推定例 (畑地灌漑特集). 土壌の物理性, 134: 25–40.

成岡道男, 宮本輝仁, 岩田幸良, 亀山幸司, 中村俊治 (2015): HYDRUS-1D を使ったユリ畑の上向き補給水量の算定. 農業農村工学会誌, 83: 565–570.

農林水産省農村振興局 (2016): 土地改良事業計画設計基準　計画「農業用水 (畑)」. 農業農村工学会.

Rassam, D., Šimůnek, J. and van Genuchten, M.Th. (2004): HYDRUS-2D による土中の不飽和流れの計算 (取出伸夫, 井上光弘監訳). 農業土木学会土壌物理研究部会 HYDRUS グループ.

坂井 勝, 取出伸夫 (2007): 砂質土と団粒土に対する水分移動特性関数の検討 (モデル特集論文). 107: 63-77.

Segal, E., Ben-gal, A. and Shani, U. (2006): Root water uptake efficiency under ultra-high irrigation frequency. Plant and Soil, 282: 333–341.

Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M. and van Genuchten, M.Th. (2015): The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, version 4.17, HYDRUS software series 3. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA.

Skaggs, T.H., Shouse, P.J. and Poss, J.A. (2006): Irrigating forage crops with saline waters: 2. Modeling root uptake and drainage. Vadose Zone Journal, 5: 824–837.

Sonnleitner, M.A., Abbaspour, K.C. and Schulin, R. (2003): Hydraulic and transport properties of the plant-soil system estimated by inverse modelling. European Journal of Soil Science, 54: 127–138.

Subbaiah, R. (2013): A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. Irrigation Science, 31: 225–258.

高野幸成, 猪野 誠 (2008): コカブ横縞症に対する複数の発生要因の相互関係. 千葉農総研研報, 7: 1–8.

竹内睦雄, 長江亮二 (1990): 電気探査による地下水流動モニター法の研究. 応用地質, 31: 12–18.

van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44: 892–898.

van Genuchten M.Th. (1987): A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS.

van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. and Yates, S.R. (1991): The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS.

Vellidis, G., Tucker, M., Perry, C., Kvien, C. and Bednarz, C. (2008): A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. Computers and Electronics in Agriculture, 61: 44–50.

大和陽一, 前川 進, 稲垣 昇, 寺分元一 (1992): カブの生育に及ぼす構造物の被陰の影響とそのモデル化について. 農業気象, 48: 19–28.

弓削こずえ, 阿南光政 (2016): 畑地における作物根の分布と土壌面蒸発の変動を考慮した土壌水分動態解析と消費水量の定量化 (畑地灌漑特集). 土壌の物理性, 134: 17–24.

要　　旨

本研究では，砂丘未熟土畑において，作物の消費水量を満たしながら下方への浸透損失をできるだけ抑える灌水操作方法を検討するため，砂丘未熟土畑で行われている土壌水分を比較的高めに維持する少量頻繁灌水の下での土壌水分動態を再現すると共に，灌水パラメータを変化させたときのシナリオ解析を行った．室内実験から得られた水分特性曲線パラメータを用いて土壌水分量を計算した結果，現地圃場の実測値との乖離が見られた．そこで，逆解析から得られた水分特性曲線パラメータを用いて灌水を開始する際の圧力水頭の閾値や日灌水量を変化させた場合のシナリオ解析を実施したところ，灌水を開始する際の圧力水頭の閾値を −75 cm，日灌水量 3.2 mm に設定することにより，根の吸水を抑制することなく，下方への浸透損失も少なくできると判断された．

キーワード：灌水制御，数値解析，土壌水分動態，間断灌漑