J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 136 p.3 ～ 14 (2017)

畑地灌漑特集
論　文
Original Paper

HYDRUS を用いた 湿潤地域におけるマルチ栽培下の土壌水分動態解明

宮本輝仁 [1]・岩田幸良 [1]・亀山幸司 [1]

Modelling soil water flow in plastic-mulched ridges in humid areas using HYDRUS

Teruhito MIYAMOTO[1], Yukiyoshi IWATA[1] and Koji KAMEYAMA[1]

Abstract: Dryland crops are planted in plastic-mulched ridges to suppress weed growth and support early plant emergence because of increased soil temperatures in the ridges. However, effects of plastic-mulched ridges on soil water dynamics in humid areas have not yet well investigated. This study aimed to evaluate soil water flow in a field covered with plastic mulch using the HYDRUS (2D/3D) model. Observed soil water contents in an eggplant (*Solanum melongena L.*) filed with plastic-mulched ridges in the summer of 2012 were validated with the water flow model. Boundary conditions and two parameters of the root water extraction model were investigated for several simulation scenarios. A reasonably good agreement between the model-predicted and observed soil water contents in plastic-mulched ridges was found. Simulation results revealed the water flows in plastic-mulched ridges during rainfalls. Soil water contents were higher in ridges without mulch than in ridges with mulch. Moreover, soil water contents fluctuate greater in bare ridges than in mulch covered ridges. We concluded plastic mulch at the soil surface could moderate the water content increase in the soil profile during the rainfall in the humid area.

Key Words : mulch, soil water, irrigation, HYDRUS (2D/3D), humid areas

1. はじめに

マルチ栽培は畝を被覆して作物を栽培する方法である．マルチ栽培では土壌面蒸発の抑制や雑草の発生抑制，地温上昇等の効果が期待できる．そのため，野菜や果樹の栽培でよく用いられる方法である．

マルチ資材を施された畝は土壌面蒸発が抑制される一方，通路として使われる畝間は裸地状態であるため，畝と畝間では土壌水分動態や水分消費特性が大きく異なる．マルチフィルム被覆により土壌水分消費が抑制されること（谷川ら, 2000）やフィルム被覆下にある根群への降雨による水分補給は水平や斜め方向の水分の再配分に依存することが既に報告されている（谷川ら, 2000; 安中・花山, 2014）．また，マルチフィルムに開けられた植栽孔から降雨浸透が生じ，畝の土壌水分が増加することも知られている（鈴木, 1998; 原口, 2009）．これらの結果はマルチ栽培下の土壌水分動態には，畝と畝間の両方の土壌水分動態が相互に関係していることを示している．そのため，マルチ栽培下での土壌水分動態には 2 次元的な解析が必要となる．

近年，水・溶質移動汎用プログラムが整備されてきている．このような汎用プログラムを利用した数値解析は複雑な地形や様々な境界条件にも対応できるため，畑地の水・施肥管理にも応用されてきている（Nakamura et al., 2004; Bastiaanssen et al., 2007; Subbaiah, 2013）．その代表的な汎用プログラムの一つが HYDRUS（2D/3D）であり，地表灌漑や点滴灌漑，地中灌漑による 2 次元的な水・溶質動態解析に多く使用されてきた（Abbasi et al., 2004; Gärdenäs et al., 2005; El-Nesr et al., 2014）．最近では，HYDRUS（2D/3D）は主として乾燥地域を対象としてマルチ栽培下での水・溶質動態解析にも応用され始めている（Wang et al., 2014; Li et al., 2015）．しかし，湿潤地域におけるマルチ栽培下での水・溶質動態の解析例は少なく（Ruidisch et al., 2013），湿潤地域におけるマルチ被覆の効果について議論したものも少ない．今後，わが国の畑地灌漑計画にも数値解析を応用していく上で，実際の営農環境の再現は重要な課題である．

そこで，本研究では，宮本ら（2013）によりマルチ栽培下で観測された土壌水分量をもとに，HYDRUS（2D/3D）を用いてマルチ栽培下の土壌水分動態を解析し，湿潤地域におけるマルチ被覆の効果を考察することを目的とした．数値解析に用いる全ての計算条件を事前に決定することが難しいため，境界条件や根の吸水に関わるパラメータを変えた計算を行い，パラメータを選定した．また，境界条件を変えた数値解析結果をもとにマルチ被覆の効果について考察した．

[1]Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization, Kannondai 2-1-6, Tsukuba, Ibaraki 305-8609, Japan. Corresponding author: 宮本輝仁, 農業・食品産業技術総合研究機構　農村工学研究部門
2016 年 9 月 14 日受稿　2017 年 5 月 9 日受理

2. 材料と方法

2.1 圃場試験の概要

2012 年の夏季に農研機構農村工学研究部門内の実験圃場で，ナス栽培時の土壌水分量の測定を行った（宮本ら, 2013）．畝幅 100 cm，畝間 180 cm で畝を設置した．畝は高さが 20 cm，上辺 80 cm の台形状である（Fig. 1 参照）．畝部を黒色のフィルムマルチで覆いナス栽培を行った．6 月上旬に畝の中央に 1 m 以上の間隔で開けた植栽孔（直径 10 cm）にナスの苗を定植した．7 月から苗木 1 本に対して 3 本の支柱を立てて栽培し，草丈は 60 cm 前後で管理した．また，栽培期間中，ナスの葉は畝全体を覆うような状態であった．7 月から 10 月までの間，週に 1 ～ 2 回の頻度で収穫した．

実験圃場の土壌は淡色黒ボク土である．観測孔を掘って土壌断面を観察したところ，畝の表面から深さ 40 cm 前後に耕盤層が現れ，それを境に表層と下層に分かれた．そのため，土層は畝部（0 ～ 20 cm 深），表層（20 ～ 40 cm 深），下層 1（耕盤層，40 ～ 60 cm 深），下層 2（60 cm 以深）の 4 層に区分した．対象圃場は通常の営農作業では耕盤より浅い層の耕起が行われているため，下層の不均一性は高くなっていた．また，対象圃場は排水性が良く，地表面から 1.5 m 掘っても地下水は観察されなかった．

土壌水分量の測定は，ナス栽培区画内の 2 箇所（location 1 および location 2）において，畝の表面から深さ 5, 15, 25, 35, 50, 70 cm の 6 深度にキャパシタンスセンサー（Decagon 社製，EC-5）を設置して行った（Fig. 1 参照）．

土壌水分測定後，センサー撤去時に根の分布について観察を行った．根は畝部に多く分布し，鉛直方向には畝の表面から深さ 65 cm まで根が伸びていたことが確認された，また，水平方向には畝の中心から 40 cm 前後の範囲まで根が分布していた．

2.2 マルチ栽培下の土壌水分動態の数値解析

2.2.1 水分移動に関する支配方程式

マルチ栽培下における土壌水分動態の数値計算は HYDRUS（2D/3D）（Šimůnek et al., 2008）を用いて行った．鉛直 2 次元で根の吸水を考慮した不飽和土壌中の水分移動は Richards 式で表される．

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

ここで，θ は体積含水率（$cm^3\ cm^{-3}$），t は時間（d），$K(h)$ は不飽和透水係数（$cm\ d^{-1}$），h は土壌水の圧力水頭（cm），x は水平座標（cm），z は鉛直座標（cm），$S(h)$ は根の吸水速度（$cm^3\ cm^{-3}\ d^{-1}$）である．(1) 式中の $S(h)$ は Feddes モデルを用いて算定できる．

$$S(h) = \alpha(h) b(x,z) T_p L_t \tag{2}$$

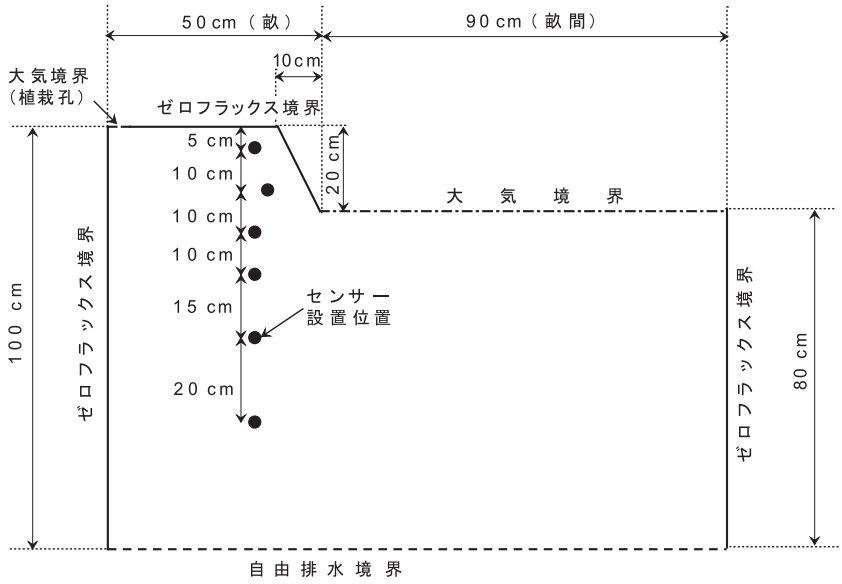


Fig. 1 センサー設置位置と境界条件の設定：現場は植栽孔を中心に左右対称であり，実際の畝幅や畝間の長さは倍の値となる．また，畝表面から 5，15 cm 深さのセンサーは，畝部整形後に脇から設置したため，他の深さのセンサー位置とは少しずれた．
Observation points and boundary conditions used in the numerical analysis. Note that actual lengths of ridge and furrow are two times as long as boundary lengths because of symmetry of computational domain. Sensors did not lie on a straight line because sensors at 5 and 15 cm depths were installed from the side after the ridge-formed.

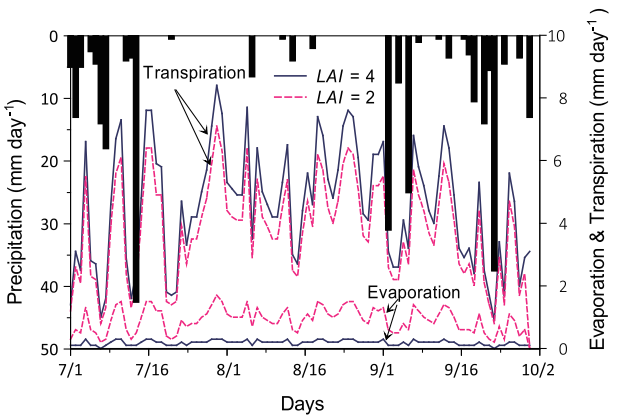


Fig. 2　栽培期間中の降水量の観測値および可能蒸発速度（E_p）と可能蒸散速度（T_p）の推定値（実線は $LAI = 4$，破線は $LAI = 2$ の場合）．
Precipitation and estimated evaporation and transpiration rates during the growing season. Solid and dashed lines indicate estimated results with $LAI = 4$ and 2, respectively.

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の水ストレス応答関数，$b(x,z)$ は正規化された根密度分布（cm^{-2}）であり，根群域を深さ方向に積分すると 1 になる．L_t は蒸散に関わる地表面長（cm）である．なお，2 次元の場合，対象土層から蒸散で失われる量は T_pL_t になり，それを根群域の面積で割るため $b(x,z)$ は cm^{-2} の単位をもつこととなる．

可能蒸発散速度（ET_p，cm d^{-1}）は農研機構農村工学研究部門内の気象観測データから Penman 式を用いて推定した．ET_p は葉面積指数（LAI）を利用した Campbell（1987）の方法により可能蒸発速度（E_p，cm d^{-1}）と T_p に配分可能と仮定して算定した（Fig. 2）．

$$E_p = ET_p\,[\exp(-0.82LAI)] \tag{3}$$

$$T_p = ET_p\,[1-\exp(-0.82LAI)] \tag{4}$$

土の水分保持曲線と不飽和透水係数を表す水分移動特性モデルには，団粒土での適用に優れている Durner モデルを用いた（Durner, 1994; Priesack and Durner, 2006; 坂井・取出, 2007）．

$$S_e = w_1[1+(\alpha_1|h|)^{n_1}]^{-m_1} + w_2[1+(\alpha_2|h|)^{n_2}]^{-m_2} \tag{5}$$

$$K(S_e) = k_s[w_1S_{e_1}+w_2S_{e_2}]^l \times \frac{\left\{w_1\alpha_1\left[1-(1-S_{e_1}^{1/m_1})^{m_1}\right]+w_2\alpha_2\left[1-(1-S_{e_2}^{1/m_2})^{m_2}\right]\right\}^2}{(w_1\alpha_1+w_2\alpha_2)^2} \tag{6}$$

ここで，$S_e = (\theta-\theta_r)/(\theta_s-\theta_r)$ であり，θ_r は残留体積含水率（cm^3 cm^{-3}），θ_s は飽和体積含水率（cm^3 cm^{-3}）である．l は間隙結合係数で 0.5 とした．w_i（$i=1,2$）は重み関数で，$w_1+w_2=1$ である．α_i（cm^{-1}），n_i（−），m_i（$=1-1/n_i$）は水分保持曲線の形状を与えるパラメータである．

2.2.2 計算土層および初期・境界条件

ナス栽培区画内の水分移動の対称性を考慮し，計算土層は畝中央から畝間中央までとした．畝部分 50 cm，畝間 90 cm となり，計算土層の深さは畝の表面から 100 cm とした（Fig. 1）．

数値解析を行った期間は 2012 年 7 月 1 日から 9 月 30 日までの 3 ヶ月である．6 月下旬に 37 mm の降雨があったことから，土層内の圧力水頭が一様に −100 cm として初期条件を与えた．

マルチで覆われた畝はゼロフラックス境界とした（Fig. 1）．また，植栽孔（直径 10 cm）は大気境界とした．大気境界条件では，降雨と可能蒸発速度を与え，土壌の乾燥に伴い地表面圧力水頭が許容最小圧力に達した段階で圧力一定条件に変更される．しかし，圃場における可能蒸発速度は畝と畝間で異なることや，マルチ部分の降雨が畝間に浸透することも考えられる．

畝間は植生が無く裸地状態であったため，可能蒸発速度が植生のある地面からの（3）式による E_p とは異なると考えられる．そのため，植生のある地面からの蒸発と裸地状態の地面からの蒸発を同様に扱えるか確認が必要である．畝間の可能蒸発速度を畝の（3）式による E_p と Penman 式による ET_p（$=E_p+T_p$）の 2 種類で与えたときの大気境界条件で計算を行い，畝間の可能蒸発速度の与え方を検討した．これらの複数の大気境界条件を与えるため，HYDRUS（2D/3D）の変動フラックス境界のオプションを利用した．

また，マルチで覆われた畝に降った雨の一部は植栽孔や畝間から土壌中に浸透すると考えられる．マルチで覆われた畝に降った雨が畝間に浸透することを想定すると，畝と畝間，植栽孔の長さをもとに，（畝 + 畝間 + 植栽孔）÷（畝間 + 植栽孔）（$140 \div 95 = 1.47$）を考慮して，降雨量を観測値の 1.47 倍した値を畝間と植栽孔に与える方法が考えられる．そこで，降雨期間については，畝間と植栽孔に与える降雨量（R）に実測の降水量を与える場合（1.0R）と 1.47 倍した値を与える場合（1.47R）の 2 種類の計算を行い，大気境界条件における降雨浸透の扱い方を検討した．実測の降水量は Fig. 2 に示した．

下部境界条件は計算期間を通じて地下水位が十分低いと仮定して自由排水として与えた．畝と畝間の対象性を考慮して側面の境界条件はゼロフラックス境界として与えた．

2.2.3 パラメータの選定

対象土層は土壌断面調査結果をもとに，畝の地表面から 20 cm（畝部），20 ～ 40 cm（表層），40 ～ 60 cm（下層 1），60 cm 以深（下層 2）の 4 層に分けた．それぞれの土層の Durner モデルのパラメータは乾燥過程で得ら

Table 1 本研究で用いた Durner モデルの土壌水分移動パラメータ.
Soil water hydraulic parameters of Durner model used in this study.

	θ_r	θ_r	α_1	n_1	α_2	n_2	w_2	K_s [cm d^{-1}]
0 – 20 cm	0.0	0.753	0.789	1.05	0.061	2.89	0.338	517.0
20 – 40 cm	0.0	0.741	0.167	1.04	0.041	4.29	0.291	128.2
40 – 60 cm	0.0	0.694	0.051	1.58	0.0005	1.12	0.726	11.8
60 – 100 cm	0.0	0.741	0.0001	1.12	0.053	2.15	0.367	80.3

れた土壌水分特性の実測値を用いて求めた．Durner モデルの実測値へのフィッティングには水移動特性関数の解析プログラム（RETC）を用いた（Fig. 3）．具体的なパラメータの値は Table 1 に示す．なお，本研究ではヒステリシスは考慮しないこととした．

根の吸水速度を求める（2）式中の $\alpha(h)$ には Feddes モデルのパラメータを与える必要がある．本研究で対象としたナスは HYDRUS（2D/3D）の中のデータベースには無いため，同じナス科のトマトのパラメータを代用した．これらのパラメータを使うと，−800 cm または −1500 cm より圧力水頭が下がると可能蒸散速度（0.5 cm d^{-1} または 0.1 cm d^{-1}）に対して蒸散速度が減少する過程を表現できる．また，（2）式中の T_p を算出するための（4）式には *LAI* の数値が必要である．しかし，圃場試験時には *LAI* の調査を行わなかったため具体的な数値は無かった．そこで，調査時の記録写真から 7 月から 9 月にかけてナスが十分生長していたことを確認するとともに，文献（例えば，細井, 2001; 草川ら, 2013; 凌 · 安養寺, 1996）を参考に計算期間中の *LAI* を 4 と仮定した．ただし，*LAI* の値は E_p と T_p に直接的に影響を与え，水分移動形態へ寄与も大きいと推察される．このため，*LAI* = 2，4 としたときの計算を行い，土壌水分変動に与える影響を検討した（Fig. 2）．さらに，（2）式中の L_t も根の吸水速度を求める上で重要なパラメータであるため同様の検討を行った．栽培期間中，ナスの葉は畝を覆うような状態であったことから，L_t は 50 cm が妥当と考えられた．しかし，L_t の具体的な算定方法は不明な部分もあるため，L_t = 30 cm，40 cm，50 cm の 3 種類を与えた場合の計算を行い，結果を比較検討した．

根密度分布は観察結果をもとに，鉛直方向には深さ 10 cm で最大，深さ 65 cm でゼロになるように線形補間して与えた．また，水平方向には畝の中心部で最大，中心から 40 cm の地点でゼロになるように線形補間して与えた．

2.2.4 マルチ被覆が無い場合の数値解析

湿潤地域におけるマルチ被覆の効果を考察するため，マルチ被覆が無い場合の数値解析を行った．マルチで覆われた場合にゼロフラックス境界として扱った境界条件（Fig. 1 の畝部）を，大気境界に変更して計算した．そのため，畝部にも E_p が与えられる．

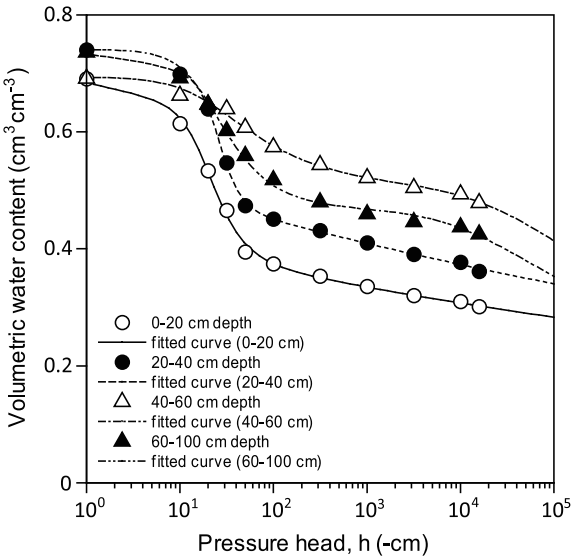


Fig. 3 土壌水分特性の実測値と Durner モデルでのフィッティング結果.
Measured and estimated retention curves for an Andisol using Durner (1994) model.

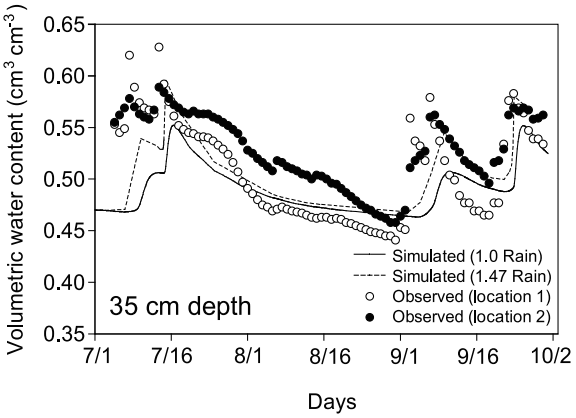


Fig. 4 畝間に与える降雨条件が計算結果に及ぼす影響（35 cm 深の土壌水分量の経時変化）：プロットは実験圃場内の 2 箇所で観測された実測値，実線，破線はそれぞれ降水量の観測値，1.47 倍した値を用いた計算値.
Comparisons between observed and simulated volumetric water contents applied either original or 1.47 times rainfall data to the bare soil between ridges (35 cm depth): open and filled circles are the observed data at two locations in the experimental field, and solid and dashed lines indicate simulated results with original and 1.47 times rainfall data, respectively.

3. 結果と考察

3.1 計算条件の検討

マルチ栽培下における計算土層の上部境界からの降雨浸透の扱い方を検討するため，畝間と植栽孔に対して観測された降雨量（R）を与える場合（1.0R）と畝部に降った雨量を加えて大きな降雨量を与える場合（1.47R）の比較を行った．Fig. 4 は畝間と植栽孔を E_p の大気境界条件として扱い，$L_t = 50$ cm，$LAI = 4$ のときの計算結果である．畝間と植栽孔に対して 1.47R を与えた場合（図中破線），土壌水分量が常に多く計算され，降雨時の土壌水分量の増加がより急激になることがわかる．また，35 cm 深では 1.47R を与えたときのほうが 1.0R よりも降雨時の土壌水分変動傾向と類似している．HYDRUS（2D/3D）では HYDRUS1D と異なり湛水を許容していない．湛水を生じるような降雨があっても瞬時に湛水が消失するとして計算される．そのため，マルチの上に降った雨が畝間に流れて湛水が生じる場合には，計算上の工夫が必要になる．Ruidisch et al.（2013）も畝間により多くの降水量を与えることにより土壌水分変動の再現性が向上することを報告している．これらの結果から，マルチ栽培下における土壌水分動態の数値解析では，畝と畝間の長さに応じて，畝間に与える降雨量を増加させて浸透量として与える方法が有効であると考えられた．これ以降，畝間に 1.47R を与えて計算した結果を示した．

次に畝間の境界条件を検討するために，畝間の可能蒸発速度を畝と同様に E_p とした場合と ET_p とした場合の計算結果を Fig. 5 に示す．Fig. 5 は畝間と植栽孔に 1.47R を浸透量として与え，$L_t = 50$ cm，$LAI = 4$ のときの計算結果である．畝間の大気境界条件の可能蒸発速度を E_p とした場合（図中実線），可能蒸発速度を ET_p とした場合（図中破線）と比べて土壌水分量が多く見積もられ，降雨時の土壌水分変動も大きくなった（例えば，25 cm 深や 35 cm 深）．畝間の可能蒸発速度を ET_p とした場合，無降雨時の畝間からの水分損失が T_p だけ多く計算されるためである．実測値との比較より，畝間の大気境界条件の可能蒸発速度を E_p としたほうが土壌水分変動をよく再現できることがわかる（5 cm 深や 35 cm 深，50 cm 深）．このことは，畝間が作物により日射が遮断され

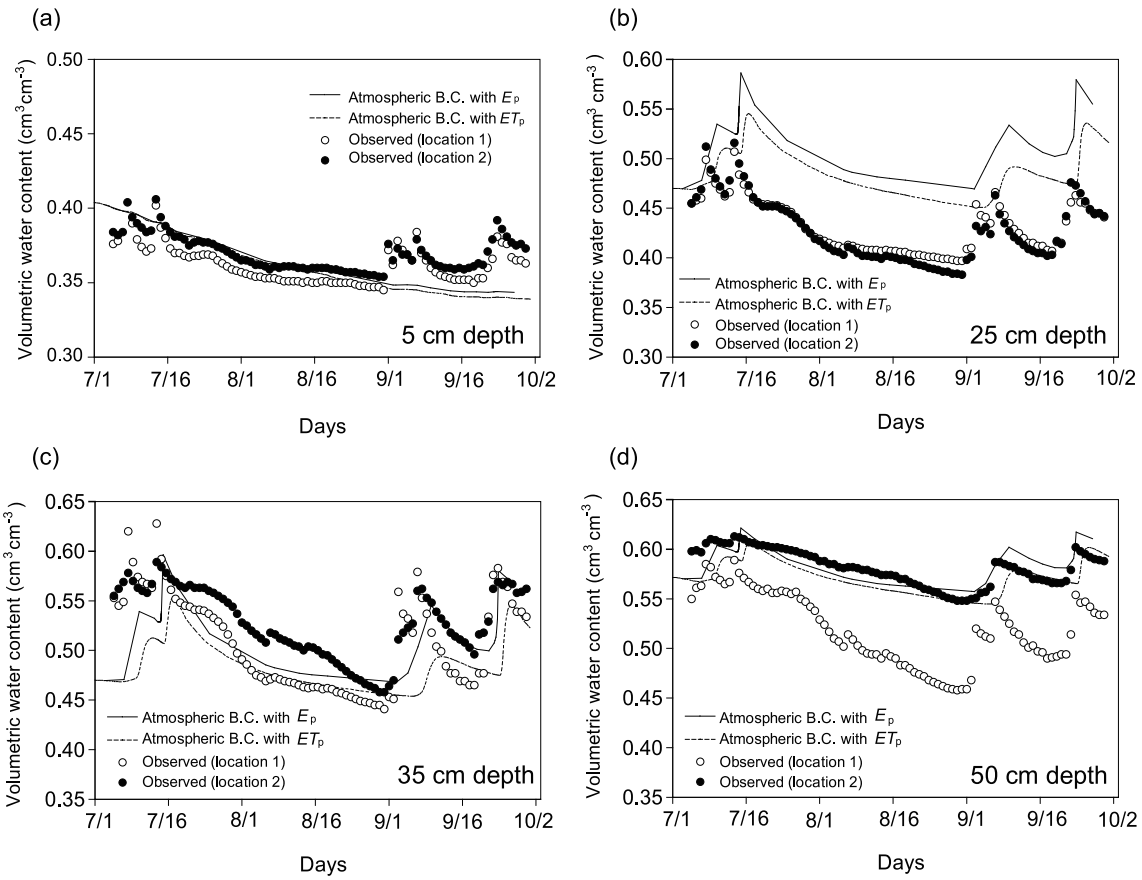


Fig. 5　畝間の可能蒸発速度を E_p としたときと ET_p としたときの計算結果と実測値の比較（a，5 cm 深；b，25 cm 深；c，35 cm 深；d，50 cm 深）：プロットは実験圃場内の 2 箇所で観測された実測値，実線，破線はそれぞれ可能蒸発速度を E_p としたときと ET_p としたときの計算値．

Comparisons between observed and simulated volumetric water contents with two kinds of atmospheric boundary condition (a, 5 cm depth; b, 25 cm depth; c, 35 cm depth; d, 50 cm depth): open and filled circles are the observed data at two locations in the experimental field, and solid and dashed lines indicate simulated results when evaporation rates from soil surface are E_p and ET_p, respectively.

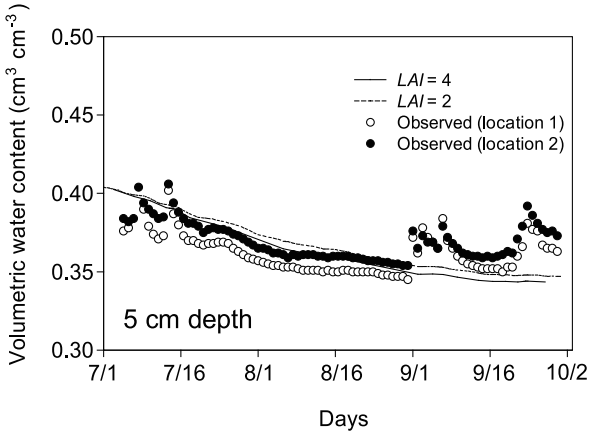


Fig. 6 *LAI* の値が計算結果に及ぼす影響（5 cm 深の土壌水分量の経時変化）：プロットは実験圃場内の 2 箇所で観測された実測値，実線，破線は $LAI = 4$ と $LAI = 2$ を与えたときの計算値.
Comparisons between observed and simulated volumetric water contents with different *LAI* values (5 cm depth): open and filled circles are the observed data at two locations in the experimental field, and solid and dashed lines indicate simulated results with $LAI = 4$ and 2, respectively.

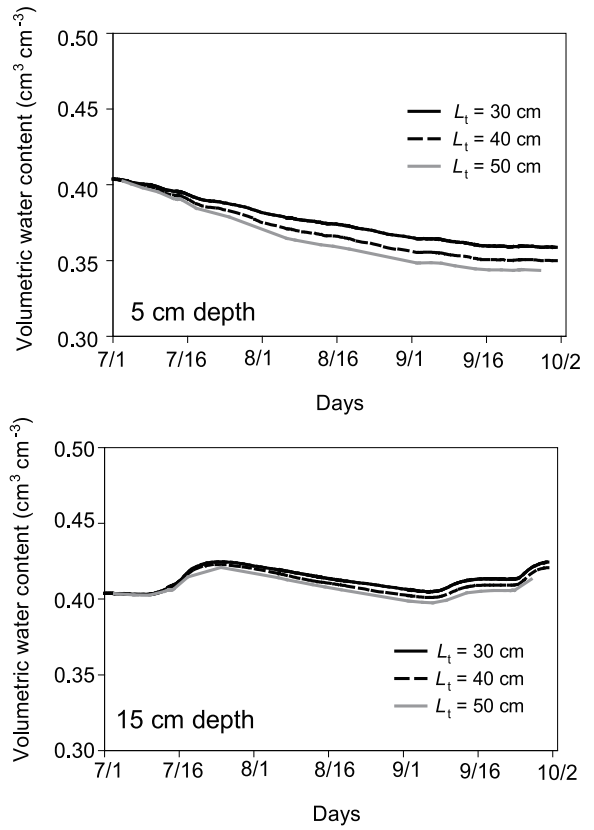


Fig. 7 蒸散に関わる地面長（L_t）の値が計算結果に及ぼす影響.
Simulated volumetric water contents with three different soil surfaces associated with transpiration.

やすく，無降雨時には植生のあるときの土壌面蒸発と同様に扱うことが可能であることを示唆している．そのため，本研究では畝間は可能蒸発速度を畝と同様に E_p として計算を行った.

さらに作物根による吸水量に影響を及ぼすパラメータのうち，*LAI* と L_t についても値を変えて計算を行った．Fig. 6 は $LAI = 2$ と $LAI = 4$ のときの計算結果（図中実線，破線）である．5 cm 深では $LAI = 2$ ほうが $LAI = 4$ よりも土壌水分量が高く推移している．土層が乾燥していく過程では，$LAI = 4$ のほうが土壌水分減少をよく再現できることがわかる．他の深さでは，$LAI = 2$ と $LAI = 4$ の計算結果の違いは小さい．これらの検討結果より，本研究で文献値等を参考に設定した $LAI = 4$ は比較的妥当なものであったと判断される．また，Fig. 7 は $L_t = 30$, 40，50 cm としたときの計算結果である（図中実線，破線，一点差線）．L_t による土壌水分量の違いは，5 cm 深と 15 cm 深で顕著に現れた．より深い層では L_t による違いは小さかった．(2) 式で算定される根の吸水速度は，根密度分布の関数である．本研究では根密度分布を畝部でより大きくなるよう設定した．そのため，畝部で L_t による影響が顕著に現れたと考えられる．$L_t = 50$ cm とした場合の計算結果は 5 cm 深の土壌水分減少過程をよく再現しており，また，栽培期間中，ナスの葉は畝を覆うような状態であったことから $L_t = 50$ cm として数値解析を行った.

3.2 土壌水分変動の再現性

3.1 節の検討から得られた計算条件を用いて得られた計算結果を Fig. 8 に示す（図中実線）．本研究では室内実験で得られた水分移動パラメータを用いた順解析を行った．そのため，野外の実測値に計算値を合わせるような水分移動パラメータの逆解析は行なっていない．Fig. 8 を見ると，畝表面から 35 cm 深までは比較的良く土壌水分量の変動傾向を再現できたと判断される．ただし，5, 15 cm 深は，マルチに覆われた畝内に位置し降雨浸透がないため土壌水分量の計算値は単調減少となったが，大雨時には降雨浸透があった実測値と乖離を生じている．また，25 cm 深では計算値が 2 つの実測値に比べて過大評価となったが，変動傾向は適合していた．これらに対して，50 cm 深と 70 cm 深における計算値は location 1 の実測値からは大きく外れている．下層はほとんど耕うんされないため，土壌の物理性の空間的なバラツキが大きい．水分移動パラメータを推定した不攪乱試料を採取した地点は，土壌水分量の測定を行った地点とは別の地点であったため，地点間の土壌の物理性の違いが反映されたものと考えられる.

Fig. 9 に 9 月 23 日に 37.5 mm の降雨があったときの降雨当日と降雨後 1 日目の土壌断面内の水分分布を示す．降雨量は観測値の 1.47 倍のときの結果である．マルチで覆われた畝は根の吸水や移植時にマルチに開けた穴からの降雨浸入等により 3 次元的な水分分布となる（鈴木, 1998; Haraguchi et al., 2003）．今回の計算結果は，植栽孔の中心を通り畝方向に対して垂直に切った土壌断面内の水分分布になる．Fig. 9 を見ると，畝中央部からの位置や異なる土層間で土壌水分が大きく変動することがわかる．そのため，Fig. 8 に示した実測値と計算値の違いの原因は，現地における水分移動パラメータと室内

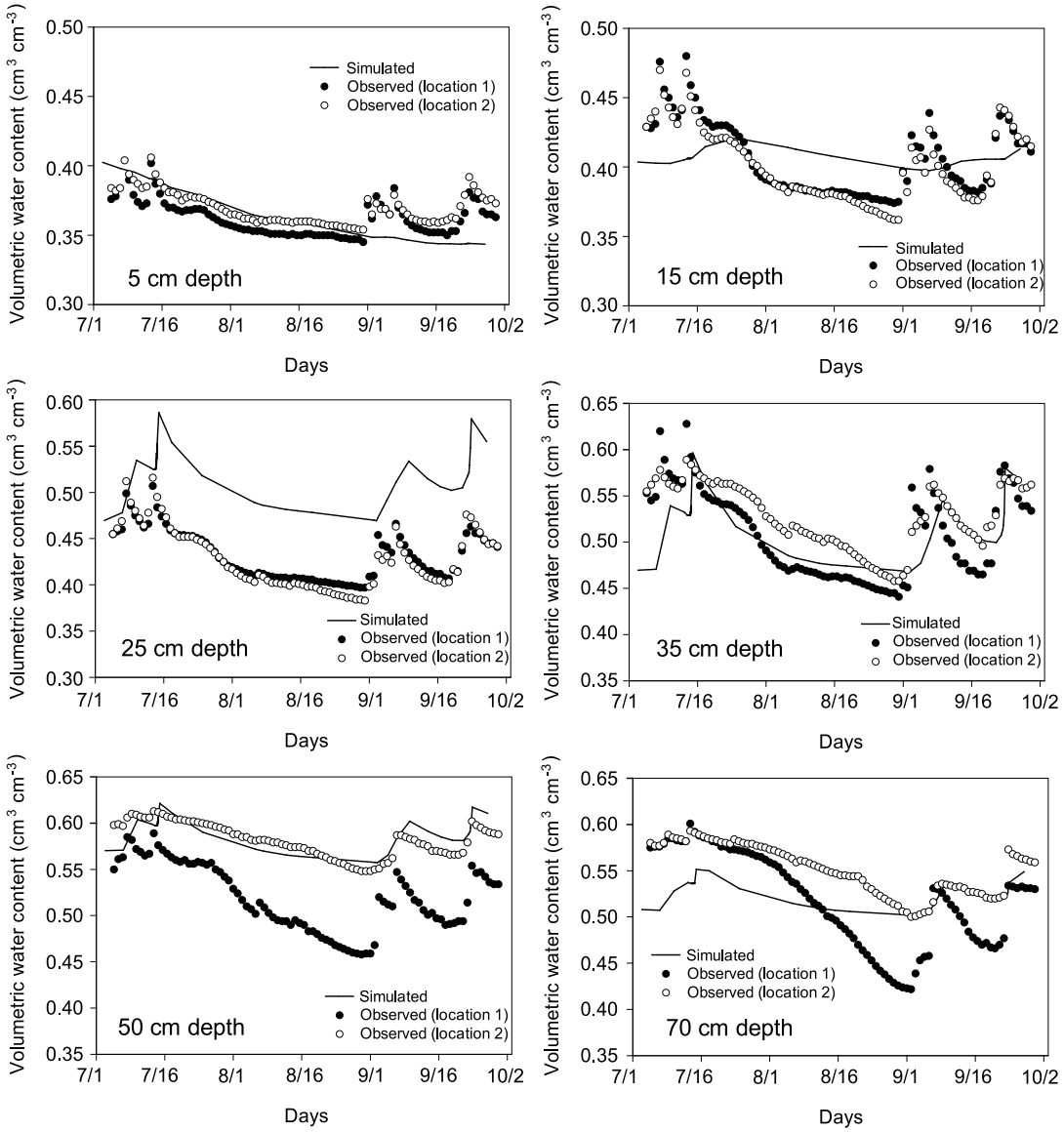


Fig. 8　センサー設置位置における土壌水分量の計算値と実測値の比較（2012 年 7 月～9 月）：プロットは実験圃場内の 2 箇所で観測された実測値，実線は計算値．
Simulated and observed volumetric water contents at different locations sensor installed (from July to September in 2012): open and filled circles are the observed data at two locations in the experimental field, and solid line describes simulated results.

実験で得られたものとの違いの他，センサー設置位置と計算位置のわずかな違いや土層の切り方などが考えられる．

3.3 マルチ栽培下での土壌水分動態の特徴

Fig. 10 に 9 月 23 日に 37.5 mm の降雨があったときの降雨当日と降雨後 1 日目の土壌断面内の土壌水分移動速度ベクトルの分布を示す．降雨当日には畝間部分と植栽孔から降雨浸入が生じることがわかる（Fig. 10（a））．植栽孔からの降雨浸入による土壌水分環境への影響範囲は畝中央部から 15 cm 前後であった．これまでにもマルチ栽培下での土壌水分環境に与える植栽孔の影響が大きいことは指摘されており，一つの畝に 2 列の植栽孔が配列されている場合，植栽孔からの降雨浸入によって畝全体の水分がほぼ均一になることが報告されている（鈴木, 1998 ; 原口, 2009）．本研究で対象とした畝は植栽孔が中央部に 1 列配列されていたため，植栽孔からの降雨浸入は畝全体には広がらなかったと考えられる．また，降雨当日の畝間からの浸透水は，鉛直成分が卓越していることもわかる．畝と畝間の境界付近の水分移動方向も鉛直下向きから 45° の方向を示している成分が多く，土層が成層状態であったことによる影響は小さかった．

降雨後は，畝間に浸透した降雨が主として 20 ～ 40 cm 深の土層（表層）を通じて畝部に移動した．また，降雨中は速度ベクトルが鉛直下向きから 45° の方向を示した畝と畝間の境界付近の下層では土層の境界面に沿って根群域に向かって土壌水分移動が生じていることがわかる（Fig. 10（b））．安中・花山（2014）はトンネル栽培された砂丘地における土壌水分測定から，トンネル内の株間における土壌水分は 5 cm 深と 15 cm 深ではトンネル外の降雨の影響がほとんど無かったが，50 cm 深でトンネ

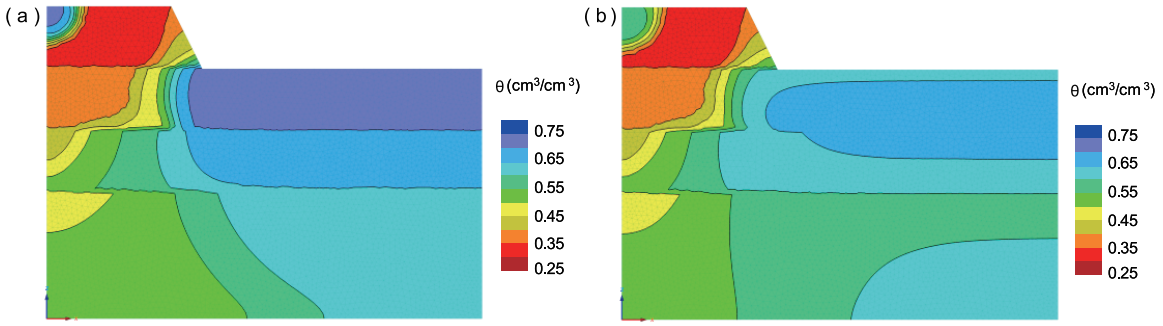


Fig. 9 9 月 23 日に 37.5 mm の降雨があったときの土壌水分分布の計算結果（a：降雨当日，b：降雨後 1 日目）．
Simulated distribution of volumetric water contents in soil profile during and after 37.5 mm rainfall on 23rd September. (a, during rainfall; b, 1 day after rain event)

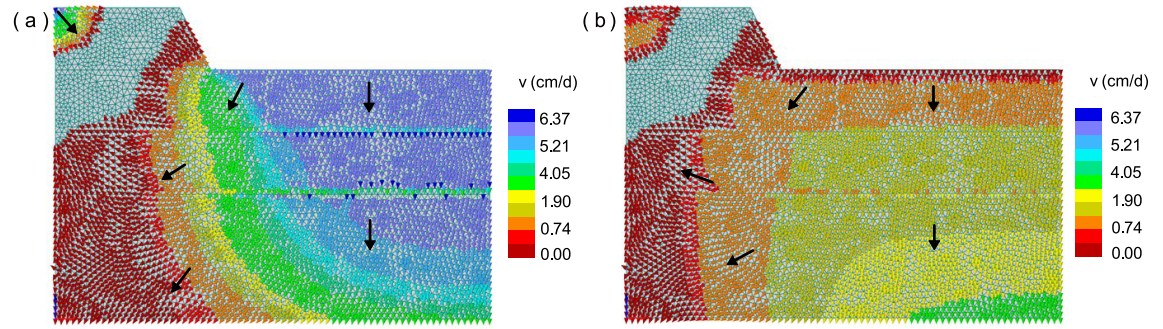


Fig. 10 9 月 23 日に 37.5 mm の降雨があったときの土壌水分移動速度ベクトル分布の計算結果
（a：降雨当日，b：降雨後 1 日目）：矢印は主要なベクトルの向きを示す．
Simulated distributions of water velocity vectors in soil profile during and after 37.5 mm rainfall on 23rd September. (a, during rainfall; b, 1 day after rain event). Directions of main vector are indicated by arrows.

ル外の土壌水分と同様になったことを報告している．鈴木（1998）や谷川ら（2000）はマルチ施用畑地の土壌水分移動の駆動力は，根による吸水や降雨の遮断による乾燥の継続による畝部の土壌水の圧力水頭の低下であるとしている．本研究における計算結果もこれらの既存の研究成果と一致している．このように，土壌水分移動の駆動力の及ぶ範囲は根群域とその周囲に限られること，畝間の下層に浸透した降雨の多くは下方浸透となり，根群域への水分供給に寄与する水分移動は限定的であることが示唆された．現地観測では限られた地点でのデータとなるが，数値解析と組み合わせることにより，マルチ栽培下での土壌水分動態の特徴を捉えることができることが示された．

本研究では畝と畝間の土層内における水分動態に着目した数値解析を行った．しかし，マルチに覆われた畝部の土壌水分動態は複雑で，例えば，マルチで被覆された部分の地温変化による水蒸気移動やマルチ内表面への水分の凝集とマルチ下の土壌中での水の再分布なども生じる．マルチに覆われた畝部の土壌水分動態をより詳細に把握するためには熱や水蒸気移動も考慮した数値解析が必要となる．本研究の対象範囲を超えていたため，ここまでの数値解析を行わなかったが，今後の課題としたい．

3.4 マルチ被覆による土壌水分制御

Fig. 11 にマルチ被覆の有無によるセンサー設置位置の土壌水分量変化の違いを示す．ここでは，計算土層内への降雨浸入量を同じにするため，「マルチ有り」では畝間と植栽孔に対して 1.47R を与えたときの結果（図中実線）を示す．また，「マルチ無し」では 1.0R を与えたときの結果（図中破線）を示す．マルチに覆われていた畝は，マルチが無くなると降雨イベントに追随して土壌水分量が変動するようになる．また，降雨後に土壌水分量が減少しても，マルチ有りのときの土壌水分量まで乾燥することはなく，土壌水分量が高い状態が続くこともわかる．25 cm 深 ～ 35 cm 深でもマルチ無しの場合のほうが常に高い土壌水分量を示した．下層の土壌水分量は表層に比べて変動幅は小さいが，マルチ無しの場合，比較的大きな降雨時には降雨に対応して土壌水分変動が生じる．しかし，70 cm 深より深い土層では，マルチ被覆の有無の影響はほとんど現れない計算結果となった．

Fig.12 にマルチ被覆の有無による特徴的な圧力水頭分布を示した．7 月 12 日から 14 日にかけて 50 mm の降雨があった．マルチ被覆があるとき，降雨後 1 日目には植栽孔からの降雨浸入により表層付近の根群域の圧力水頭が増加する（Fig.12 (a)）．しかし，降雨後 5 日目には

根の吸水によって根群域の圧力水頭が低下し，根がストレスを受けている（Fig.12（b））．これに対して，マルチ被覆が無いとき，降雨により土層のほぼ全体が $h = -900$ cm 以上となり，根の吸水にもストレスがかからない状況となる（Fig.12（c）と（d））．

計算期間の積算蒸発量，積算蒸散量，積算深部排水量および積算浸透量を Table 2 に示す．これらの値は HYDRUS（2D/3D）の中では，フラックスを境界線と時間に対して積分して得られる．そのため，大気境界条件の境界線の長さで除して水頭換算値も併せて示した．

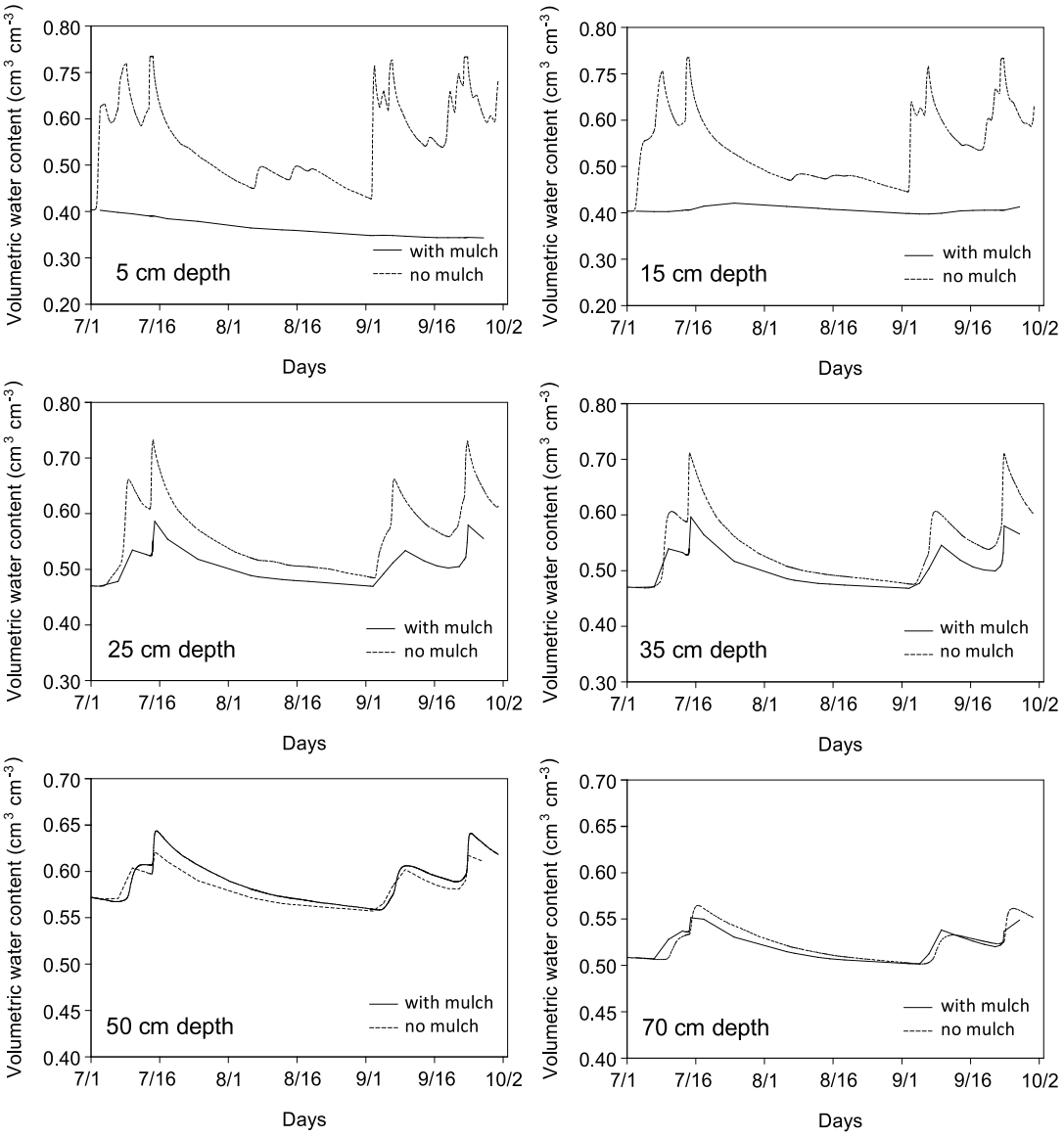


Fig. 11　マルチの有無による深さ別の土壌水分量の経時変化の比較.
A comparison of simulated volumetric water contents with/without mulch at different depths.

Table 2　マルチの有無による計算期間全体の水収支の違い.
Water balance of the model flow domain with/without mulching after the simulation period.

	Cumulative Rainfall	Cumulative Evaporation	Cumulative Transpiration	Cumulative Deep Drainage	Change in Storage (ΔS)
マルチ有り	3683.5 cm^2 (264 mm)	143.8 cm^2 (15.3 mm)	505.2 cm^2 (101 mm)	2596.5 cm^2 (185 mm)	438.0 cm^2
マルチ無し	3784.8 cm^2 (270 mm)	219.2 cm^2 (15.7 mm)	938.5 cm^2 (188 mm)	1887.9 cm^2 (135 mm)	739.2 cm^2

* カッコ内の値は大気境界条件の境界長で除して水頭換算値にしたもの.

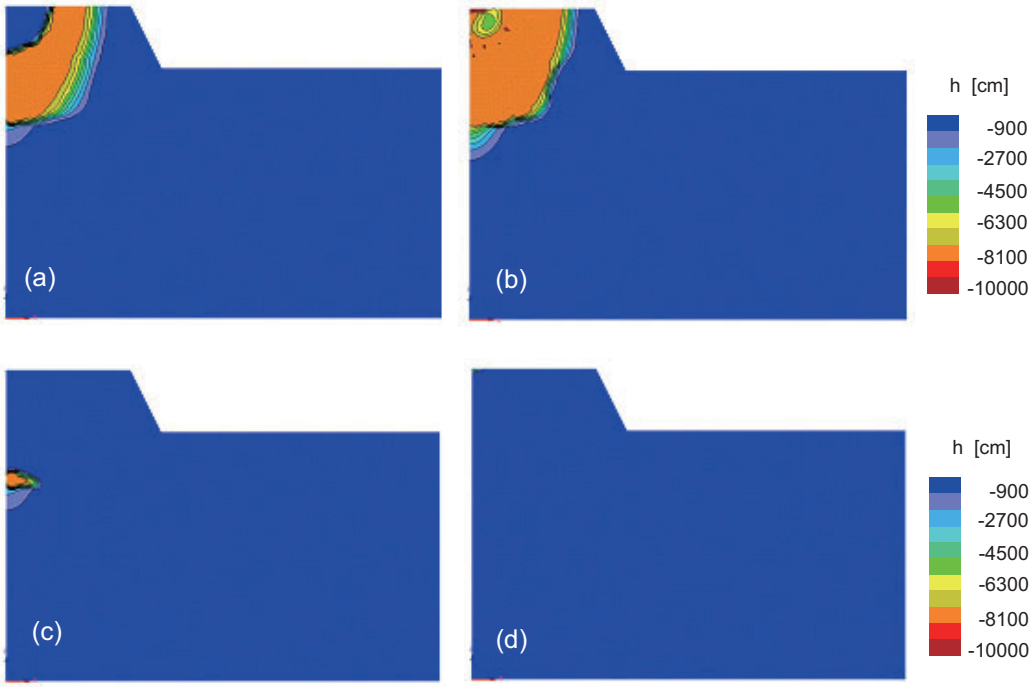


Fig. 12 7 月 12 日から 14 日にかけて 50 mm の降雨があった後のマルチ被覆の有無による圧力水頭分布の比較：a，降雨後 1 日目のマルチ被覆有り；b，降雨後 5 日目のマルチ被覆有り；c，降雨後 1 日目のマルチ被覆無し；d，降雨後 5 日目のマルチ被覆無し．
Comparisons of simulated pressure head distributions with/without mulch after 50 mm rainfall from 12th to 14th July. (a, 1 day after rainfall, with mulch; b, 5 days after rainfall, with mulch; c, 1 day after rainfall, without mulch; d, 5 days after rainfall, without mulch).

単位長さあたりの蒸発量はマルチの有無にかかわらず同様となったが，土層全体から蒸発によって失われた水分量は，マルチ無しのほうが大気境界の範囲が長い分多くなった．蒸散量はマルチ無しのほうがマルチ有りより 1.8 倍程度多くなった．マルチ無しでは根群分布を設定した範囲の土層内の土壌水分量が降雨に伴い増加するため，根の吸水速度が水ストレスにより圧力水頭（または土壌水分量）に依存して減少することが少なかったことによる（Fig.12）．深部排水量は，逆に，マルチ有りのほうがマルチ無しより 1.4 倍程度多くなった．これは畝間からの浸透水は鉛直下方移動が卓越し，畝部への水分供給には限りがあることを反映している（Fig. 10）．また，数値解析では畝間に与える降雨量を増加させて浸透量として与えたため，浸透水の鉛直下方移動がより多くなったと考えられる．土層全体での貯留量変化はマルチ無しのほうがマルチ有りより多くなった．この結果は Fig. 11 の土壌水分量の経時変化とも一致する．マルチ栽培ではマルチに覆われて降雨が遮断されてしまう畝部にあたる 5 cm 深 ～ 15 cm 深での降雨貯留がマルチ無しでは可能となるためと考えられる．

マルチ被覆の効果として土壌面蒸発の抑制が挙げられるが，効果の現れ方は降水量と蒸発散量のバランスにより異なる．乾燥地や半乾燥地では土壌面蒸発が抑制されることで，周囲のマルチ被覆していない場所に比べて高い土壌水分状態を維持することにつながる．これに対して，降水量が蒸発散量を上回る湿潤地域では，マルチ被覆しないほうが高い土壌水分状態となりやすいと考えられる（Table 2）．そのため，湿潤地域におけるマルチ被覆の効果として，降雨による土壌水分量の急激な増加の抑制があるといえる．このようなマルチ被覆の効果により，湿潤地域では野菜や果樹でマルチ栽培を行うことにより，作土層の土壌水分が制御しやすくなると考えられる．また，マルチ被覆された畝は，根群域が乾燥しやすくなるため，マルチの下に灌水用のチューブやドリップを敷設して水分管理を行うことが有効であると考えられた．

4. おわりに

HYDRUS（2D/3D）を用いてマルチ栽培下の土壌水分動態を解析した．境界条件や根の吸水に関わるパラメータを変えた数値計算を行い，パラメータを選定した．また，黒ボク土の土壌水分特性を表現するのに適した Durner モデルと根の吸水特性を表現する Feddes モデルを採用した．土壌水分特性モデルパラメータは不攪乱試料の分析値を用いた．Feddes モデルのパラメータはトマトのパラメータを代用したが，畝部や表層では体積含水率の計算値は比較的良く実測値と合った．マルチ栽培下での土壌水分動態の数値解析を行ったところ，降雨当日には畝間部分と植栽孔から降雨浸入が生じることや，降

雨後は主として透水性の悪い耕盤に沿って根群に向かう水分フラックスが起こっていることが明らかとなった．マルチ被覆の有無による土壌水分動態を数値解析したところ，湿潤地域でのマルチ栽培は降雨による土壌水分量の急激な増加を抑制する効果があることが分かった．現地観測では限られた地点でのデータとなるが，数値解析と組み合わせることにより土層内での土壌水分動態の把握が可能となることが示された．今後，異なる入力条件で数値解析を行い，様々な要因の及ぼす影響を明らかにできれば，畑地の水・施肥管理にも有用な情報を提供できるようになると期待される．

謝辞

本研究の一部は農林水産省の基礎技術調査（計画基準調査）で実施したものであり，ここに記して関係各位に感謝の意を表する．また，HYDRUS の計算に関して有益なご助言をいただいた三重大学大学院生物資源学研究科，坂井 勝博士にも心から感謝申し上げる．

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.

安中武幸，花山 奨 (2014): メロンがトンネル栽培された砂丘畑における土壌水分・溶質量変動の 5TE センサーを用いた測定．日本砂丘学会誌，61: 1–9.

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.

Campbell G.S. (中野政詩, 東山 勇監訳) (1987): パソコンで学ぶ土の物理学, p.192. 鹿島出版会, 東京.

Durner, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Resource Research, 30: 211–223.

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, 33: 111–125.

Gärdenäs, A.I., Hopmans, J.W., Hanson, B.R. and Šimůnek, J. (2005): Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. Agricultural Water Management, 74: 219–242.

原口智和 (2009): フィルムマルチの植栽孔の大きさと土壌水分・熱環境. 佐賀大学農学部彙報, 94: 61–71.

Haraguchi, T., Marui, A., Mori, K. and Nakano, Y. (2003): Movement of water collected by vegetables in plastic-mulching field. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, 48(1,2): 237–245.

細井徳夫 (2001): 養液耕による施設栽培長段トマト固体群の収量に好適な葉面積指数に関する研究. 野菜・茶業試験場研究報告, 16: 329–349.

草川知行, 福地信彦, 井上 満 (2013): トマトの果房直下の側枝葉数を変えた栽培における葉重と果実糖度との関係. 千葉県農林総研研報, 5: 93–99.

Li, X., Shi, H., Šimůnek, J., Gong X. and Peng, Z. (2015): Modeling soil water dynamics in a drip-irrigated intercropping field under plastic mulch. Irrigation Science, 33: 289–302.

宮本輝仁, 塩野隆弘, 亀山幸司, 井口三郎, 盛永一美, 田中和博, 長谷川昌美 (2013): 畑地灌漑計画基礎緒元の算定へのキャパシタンスセンサーの適用性について. 農業農村工学会論文集, 288: 99–106.

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.

Priesack, E. and Durner, W. (2006): Closed-form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function. Vadose Zone Journal, 5: 121–124.

Ruidisch, M., Kettering, J., Arnhold, S. and Huwe, B. (2013): Modeling water flow in a plastic mulched ridge cultivation system on hillslopes affected by South Korean summer monsoon. Agricultural Water Management, 116: 204–217.

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. 土壌の物理性, 107: 63–77.

Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th. and Šejna, M. (2008): Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. Vadose Zone Journal, 7: 587–600.

凌 祥之, 安養寺久男 (1996): 土壌水分張力と *LAI* を用いた蒸発散量と作物係数の推定法. 農業土木学会論文集, 185: 15–22.

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

鈴木 純 (1998): フィルムマルチ施用畑の雨水と土壌水分の挙動. 農業気象, 54: 23–29.

谷川寅彦, 木原康孝, 福桜盛一, 矢部勝彦 (2000): フィルム被覆栽培下における造成畑の水分動態と水分消費特性. 農業土木学会論文集, 210: 103–109.

Wang, Z., Jin, M., Šimůnek, J. and van Genuchten, M.Th. (2014): Evaluation of mulched drip irrigation for cotton in arid Northwest China. Irrigation Science, 32: 15–27.

要　　旨

マルチ栽培では土壌面蒸発の抑制や雑草の発生抑制，地温上昇等の効果が期待される．本研究では，HYDRUS（2D/3D）を用いてマルチ栽培下の土壌水分動態を解析し，湿潤地域におけるマルチ被覆の効果について検討を行った．全てのパラメータを事前に決定することは難しいため，境界条件や根の吸水に関わるパラメータを変えた計算を行い，パラメータを選定した．畝部や表層では体積含水率の計算値は比較的良く実測値と合った．マルチ栽培下での数値解析から，降雨時の土壌水分動態が明らかになった．土壌水分量はマルチ無しのほうがマルチ有りよりも多くなった．さらに，土壌水分量の変動もマルチ無しのほうが大きくなった．これらの解析結果から，湿潤地域におけるマルチ被覆の効果は，降雨による土壌水分量の急激な増加の抑制であることがわかった．

キーワード：マルチ栽培，土壌水分，畑地灌漑，HYDRUS（2D/3D），湿潤地帯