J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 145, p.3 ～ 10 （2020）

論　文
Original Paper

ELPIS-JP を用いた畑地土壌水分の将来予測

辻 卓弥[1]・藤井理樹[1]・坂口 敦[2]

Future prediction of field soil moisture using ELPIS-JP

Takuya TSUJI[1], Toshiki FUJII[1] and Atsushi SAKAGUCHI[2]

Abstract: To examine the effect of climate change on fluctuations of soil water, we estimated the future soil water conditions of two fields in Yamaguchi, Japan. Firstly, we observed the suction of soil water at the fields in Yamaguchi for two years and modeled the soil water flux by using the observed data and HYDRUS-1D. Next, we applied future weather data of ELPIS-JP to the atmospheric boundary conditions of the field models and estimated the soil water conditions of those fields under climate change. As a result of the estimation, the number of days when the soil at a depth of 20 cm becomes drier than −49 kPa, decreases in the future as compared to the present time in the summer. However in the future, the number of days increases in the winter due to aridification, which reflects the increase in the amount of evaporation. The number of days when the soil at a depth of 20 cm becomes wetter than −3 kPa, decreases in the future over a year at both fields of Gray Lowland soil and Yellow soil. It was predicted that the fields in Yamaguchi would be drier than present soil water conditions.

Key Words : climate change, soil moisture, HYDRUS, future prediction, ELPIS-JP

1. はじめに

2014 年に公表された IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change（気候変動に関する政府間パネル）の第 5 次評価報告書では気候システムの温暖化には疑う余地がないと断定された．我が国においても年平均気温は過去 100 年間で約 1.15 °C 上昇し，降水傾向も変化していること（気象庁, 2017）から，気候変動が農業生産に影響を与えることが危惧されている．近年，世界的に大気大循環モデル（GCM）の開発が進んでおり，農業分野においても将来の気候変動による影響の評価が盛んに行われている．例えば，気候変動が農業に与える影響の予測として，気候変動後の冷夏年では現在気候下の冷夏年と比較して日本全域で冷害による被害が軽減されること（飯泉ら, 2007）や CO_2 濃度の上昇が水稲に増収効果を与えること（辰巳, 2013）などが示されており，気温や CO_2 濃度の上昇に対する作物生育の応答については多くの研究が行われている．気候変動が土壌水分に与える影響についての研究例として，加藤・西村（2015）は GCM 予測値に対し適切な時間ダウンスケーリングを施し，それらを土壌水分解析の境界条件にすることで，将来における土壌が過湿あるいは乾燥状態になる期間や頻度を予測できることを示している．また，正木ら（2018）は気候変動が水文循環に及ぼす影響について，土地利用に注目して気象条件や土壌水分の変化を評価している．このように，気候変動が土壌水分に与える影響についての研究はいくつか行われているものの，現状では多くの知見が得られているわけではない．気候変動に伴う気象条件の変化として，一般に大雨による降水量の増加や無降雨日の増加といったいわゆる極端現象が進むことが予測されているが（環境省, 2014），これらの変化が土壌水分に与える影響は不明瞭である．気象条件の変化に伴う土壌水分状態の予測は単純な水収支ではなく，複雑な土壌水の再配分過程の結果であるため，シミュレーションによる解析が有効であると考えられる．

そこで本研究では，将来の気候変動下における畑地土壌の水分状態を予測し，気候変動による気象条件の変化が土壌水分に与える影響の明瞭化を目的とした．まず，将来予測対象圃場において土壌水の吸引圧の経時変化を観測した．次に，観測データをもとに HYDRUS-1D を用いて対象圃場の土壌水分移動をモデル化した．現在様々な気候変動予測モデルが利用されているが，本研究では ELPIS-JP（Iizumi et al., 2012）を援用し，土壌水分状態の将来予測を行った．ELPIS-JP は GCM 予測値に対して時空間的にダウンスケーリングを行った気候変化シナリオデータセットであり，アメダス地点における 7 種類の気象要素（日平均・最高最低気温，降水量，積算日射量，相対湿度，風速）の日単位気象予測データが利用可能である．これらの気象予測データを圃場モデルの大気条件とし，将来の気候変動下における山口市内の畑地の土壌水分状態の予測を試みた．

[1]Faculty of Agriculture, Yamaguchi University. Yoshida 677-1 Yamaguchi, 753-8515, Japan. Corresponding author: 坂口 敦，山口大学創成科学研究科．
[2]Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University. Yoshida 1677-1 Yamaguchi, 753-8515, Japan.
2019 年 6 月 3 日受稿　2019 年 12 月 25 日受理

2. 研究方法

2.1 研究対象地及び吸引圧観測

本研究では，山口県農林総合技術センター及び山口大学内の畑地圃場を対象とした．両圃場間の距離は約 1.8 km であり，土壌種はそれぞれ灰色低地土（埴壌土），黄色土（砂質埴壌土）であった．

観測は両圃場の一角で行い，20 cm 深と 40 cm 深にテンシオメータを埋設し，土壌水の吸引圧の経時変化を 1 時間間隔で観測した（Fig. 1）．観測機器の構成については大起理化工業株式会社製のテンシオメータ（DIK-8333）に株式会社センシズ製圧力センサー（HTVN-100KP）を接続し，センサーの値を乾電池駆動の Arduino と SD シールドで作成したロガーを用いて記録した．山口県農林総合技術センター内の圃場では 2016 年 7 月 30 日から 2018 年 6 月 6 日，山口大学内の圃場では 2016 年 7 月 30 日から 2018 年 7 月 3 日までの期間で観測を行った．両圃場とも灌水は行わず，水分補給は降雨のみとした．降雨時の表流水の移動を防ぐために観測機器の周囲を 1 m 四方の木枠で囲い，さらに 3 m 四方の範囲を除草し裸地状態に維持した．なお，両圃場とも観測機器の周囲は畝立てはせず，平坦にした．

2.2 土壌中の水分移動支配方程式

本研究では，土壌水分移動予測モデルとして HYDRUS -1D（Šimůnek et al., 2013）を用いた．HYDRUS-1D では，土壌中の水分移動の支配方程式は Richards 式で表現される．

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

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 は圧力水頭（ cm H_2O），z は深さ（ cm）である．

水分特性を求める土壌水分移動特性関数として，団粒構造が発達した土壌においても水分特性を表現できる Durner-Mualem モデル（Durner, 1994）を適用した．

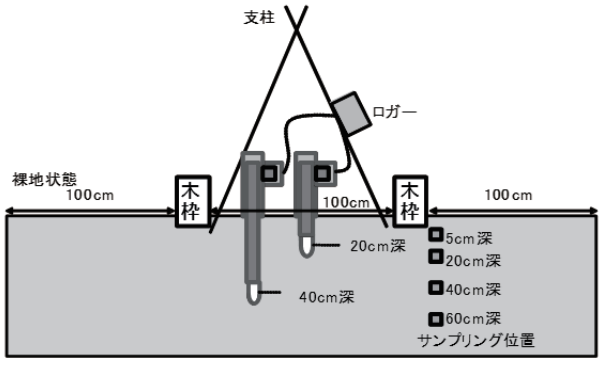


Fig. 1 観測機器の設置位置と土壌試料サンプリング位置．
Locations of tensiometers and soil sampling.

$$\begin{aligned} S_e &= \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} \\ &= w_1(1+|\alpha_1 h|^{n_1})^{-m_1} + w_2(1+|\alpha_2 h|^{n_2})^{-m_2} \end{aligned} \tag{2}$$

$$K(S_e) = K_s \frac{(w_1 S_{e1}+w_2 S_{e2})^l \left(w_1\alpha_1\left[1-\left(1-S_{e1}^{\frac{1}{m_1}}\right)^{m_1}\right]+w_2\alpha_2\left[1-\left(1-S_{e2}^{\frac{1}{m_2}}\right)^{m_2}\right]\right)^2}{(w_1\alpha_1+w_2\alpha_2)^2} \tag{3}$$

ここで，S_e は有効飽和度（–），θ_r は残留体積含水率（$cm^3\ cm^{-3}$），θ_s は飽和体積含水率（$cm^3\ cm^{-3}$），K_s は飽和透水係数（$cm\ s^{-1}$），l（–）は間隙結合係数，α_i（cm^{-1}），n_i（–），m_i（$=1-1/n_i$）は実験パラメータ（$i=1, 2$），w_i は重み付け係数であり，$w_1+w_2=1$ である．

2.3 土壌の物理性の測定

100 cm^3 の採土円筒を用いてテンシオメータの埋設深度である深さ 20 cm 及び 40 cm とその上下の深さ 5 cm 及び 60 cm の 4 深度から土壌試料を不攪乱採土した（Fig. 1）．採土後，試料の飽和透水係数，水分特性，間隙率を計測した．水分特性は 0 kPa から −9.8 kPa までを吸引法，−9.8 kPa 以降を蒸発法（Peters and Dunner, 2008）により計測した．蒸発法は上記の不攪乱試料の 1.65 cm 深と 3.65 cm 深にテンシオメータを底面から垂直方向に挿入し吸引圧を計測した．また，円筒全体を電子天秤（株式会社エー・アンド・デイ社製 EK-4100i）の上に設置し，重量変化から積算蒸発量を求めた．1.65 cm 深のテンシオメータの吸引圧が −78 kPa 程度に達した時点で実験を終了した．山口県農林総合技術センター内の圃場については，60 cm 深の試料を飽和させた際，試料が原形を保てず水分特性計測が困難であったため 3 深度のみ計測した．HYDRUS-1D を用いて蒸発実験のモデル化を行い，吸引法及び蒸発法のデータに基づき Durner-Mualem モデルのパラメータを決定した．

2.4 圃場のモデル化

HYDRUS-1D の逆解析機能を用いて，1 時間単位で観測した吸引圧を日単位に平均したデータに基づき水分特性パラメータのキャリブレーションを行った．観測データは 1 年目（2016 年 7 月 30 日から 2017 年 7 月 30 日）の 20 cm 深と 40 cm 深の吸引圧観測値を用いた．なお，−62 kPa 以下のデータはテンシオメータの測定限界を考慮して，キャリブレーションの対象となる観測データから除いた．土壌水分移動予測領域は地下水位を 200 cm 以深と仮定して，土壌深さ 200 cm とした．土壌を山口県農林総合技術センター内の圃場は，深さ 0 から 10 cm，10 から 30 cm，30 から 200 cm の 3 土層に，山口大学内の圃場は，0 から 10 cm，10 から 30 cm，30 から 50 cm，50 から 200 cm の 4 土層に分けた．各土層の水分特性パラメータの初期値は前節で決定した Durner-Mualem モデルのパラメータを与えた．計算は 2015 年 7 月 30 日か

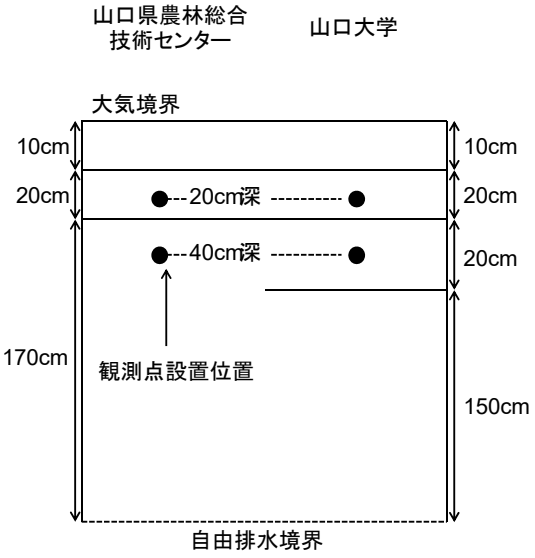


Fig. 2 圃場モデルの断面と境界条件.
Dimension and boundary conditions of the field models.

ら 2017 年 7 月 30 日までを日単位で行い，2015 年 7 月 30 日から 2016 年 7 月 30 日までを初期化期間とした．境界条件は，両圃場とも上方境界を大気境界条件，200 cm 深の下方境界を自由排水境界条件とした（Fig. 2）．大気境界条件では，各圃場地点で観測した降水量データ（2016 年 7 月 30 日 ～ 2017 年 7 月 30 日）と MeteoCrop DB（農研機構, 2010）から引用した山口市地点のポテンシャル蒸発速度を与えた．なお，初期化期間の降水量についてはアメダス山口市地点の観測値とした．

2.5 圃場モデルの検証

キャリブレート後の圃場モデルを用いて，HYDRUS-1D の順解析機能により 2016 年 7 月 30 日から 2018 年 7 月 31 日までの 20 cm 深と 40 cm 深の吸引圧を推定し，同深度の吸引圧観測値と比較することで検証を行った． 計算は 2015 年 7 月 30 日から 2018 年 7 月 31 日までを日単位で行い，2015 年 7 月 30 日から 2016 年 7 月 30 日までを初期化期間とした．大気境界条件では，各圃場地点で観測した降水量データ（2016 年 7 月 30 日 ～ 2018 年 7 月 31 日）と MeteoCrop DB から引用した山口市地点のポテンシャル蒸発速度を与えた．なお，初期化期間の降水量についてはアメダス山口市地点の観測値とした．

2.6 将来予測の比較対象とする過去 10 年間分の土壌水分の推定

本研究において，実際に吸引圧観測を行ったのは 2016 年 7 月 30 日から 2018 年 7 月 3 日までの約 2 年間のみである．より正確に現在気候における土壌水分の変動傾向を把握し将来気候における土壌水分の変動傾向と比較するために，両圃場モデルを用いて 2009 年 1 月 1 日から 2018 年 12 月 31 日までの 10 年間の吸引圧の変動を HYDRUS-1D により推定した．計算期間は 2008 年 1 月 1 日から 2018 年 12 月 31 日までを日単位で行い，2008 年 1 月 1 日から 2008 年 12 月 31 日までを初期化期間とした．大気境界条件は，アメダス山口市地点の降水量と MeteoCrop DB から引用した山口市地点のポテンシャル蒸発速度を与えた．

2.7 土壌水分の将来予測

圃場モデルの大気境界条件を ELPIS-JP 内の気象データとし，HYDRUS-1D を用いて将来の土壌水分状態を日単位で推定した．加藤 · 西村（2015）の研究においては ELPIS-JP 内の日単位気象データをさらに細かい時間単位にダウンスケーリングして土壌水分の予測を行っている．一般に GCM 予測値に対しダウンスケーリングを施すと不確実性が増すことが知られている（飯泉ら, 2010）ため，本研究では日単位予測値を用いて土壌水分の変動傾向を予測した．ELPIS-JP 内には複数の気候モデルが存在するが，本研究では気象庁気象研究所が開発した MRI を選択し，排出シナリオは二酸化炭素の排出が最多の場合である A2 シナリオを選択した．ELPIS-JP には AMeDAS 地点における日単位の気象データセットが 50 時系列分存在し，1 つの時系列は統計的に起こり得る気候シナリオの 1 つに相当するため，これらの 50 時系列は気象の変動性の幅を表している．本研究では 50 時系列の内 10 時系列を無作為に選び，10 時系列分の土壌水分の計算を各圃場モデルで行った．土壌の水分特性は現在から将来にかけて変化しないと仮定し，現在の圃場モデルと同じ各土層の水分特性パラメータで予測を行った．計算期間は 2080 年 1 月 1 日から 2090 年 12 月 31 日までの 10 年間を日単位で行い，2080 年 1 月 1 日から 2080 年 12 月 31 日までを初期化期間とした．大気境界条件は ELPIS-JP アメダス山口市地点の降水量，及び平均気温，平均風速，平均湿度，全天日射量から近藤 · 徐（1997）の式で算出したポテンシャル蒸発速度を与えた．

3. 結果と考察

3.1 土壌水分観測結果

山口県農林総合技術センター内圃場と山口大学内圃場の 20 cm 深及び 40 cm 深における吸引圧の観測値の日平均の推移を Fig. 3，Fig. 4 に示す．グラフの欠落部分は観測装置のエラーにより観測値を得られなかったため空白とした．観測値の上限について，土壌の吸引圧がテンシオメータの測定限界に達したため，85 kPa 程度までしか計測できなかった．両圃場の 20 cm 深の吸引圧を比較すると，前者の方が後者に比べて土壌の吸引圧が −49.1 kPa 以下となる日数は約 1.7 倍，−3.1 kPa 以上となる日数は約 3.7 倍多く，灰色低地土圃場の方が乾燥状態，過湿状態になりやすい傾向にあった．また，灰色低地土圃場の 40 cm 深の吸引圧の推移は比較的安定しているのに対し，黄色土圃場は 40 cm 深の吸引圧の変動幅が大きかった．

3.2 圃場モデルのキャリブレーション及び検証結果

Table 1 に両圃場の水分特性パラメータ計測値及び圃

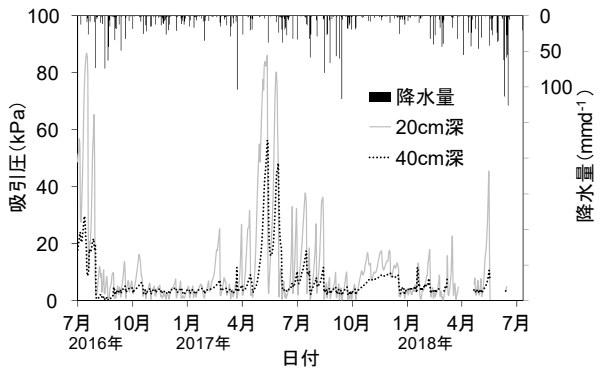


Fig. 3 山口県農林総合技術センター内の圃場の 20 cm 深及び 40 cm 深における吸引圧の観測値.
Observed suctions at depths of 20 cm and 40 cm in the field of Yamaguchi Prefectural Agriculture & Forestry General Technology Center.

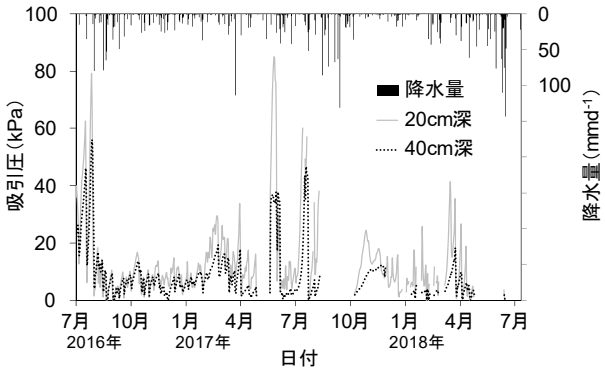


Fig. 4 山口大学内の圃場の 20 cm 深及び 40 cm 深における吸引圧の観測値.
Observed suctions at depths of 20 cm and 40 cm in the field of Yamaguchi University.

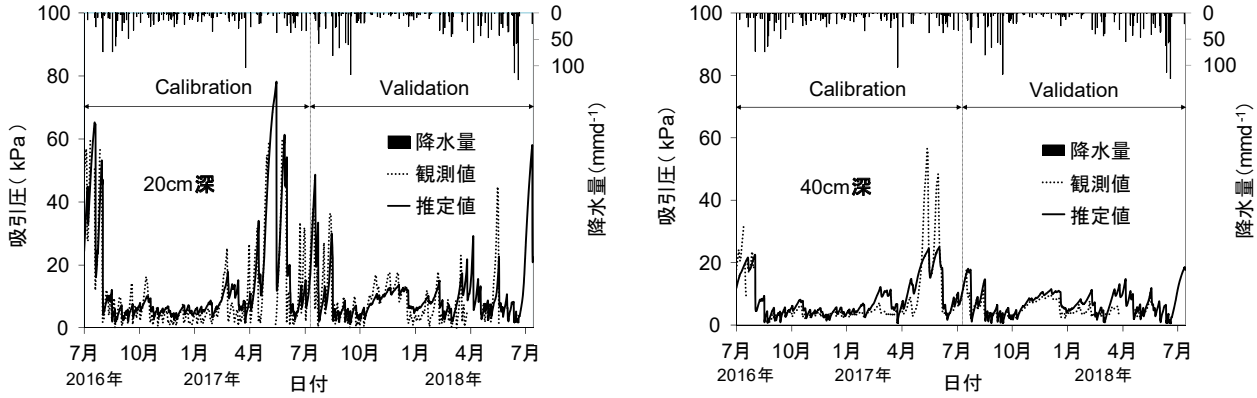


Fig. 5 山口県農林総合技術センター内圃場の深さ 20 cm 深及び 40 cm 深の吸引圧の観測値と推定値.
Observed and simulated suctions at depths of 20 cm and 40 cm in the field of Yamaguchi Prefectural Agriculture & Forestry General Technology Center.

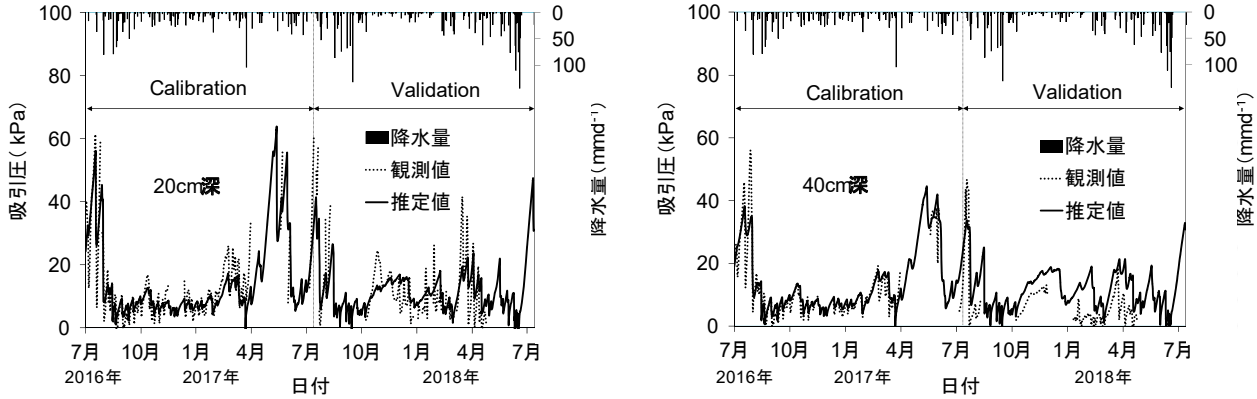


Fig. 6 山口大学内の圃場の深さ 20 cm 深及び 40 cm 深の吸引圧の観測値と推定値.
Observed and simulated suctions at depths of 20 cm and 40 cm in the field of Yamaguchi University.

Table 1 水分特性パラメータ計測値（上段）及びキャリブレート後の水分特性パラメータ（下段）.
Measured physical properties of each soil layer (upper table) and Calibrated physical properties of each soil layer (lower table).

（A） 山口県農林総合技術センター

深さ	θ_r	θ_s	α_1	n_1	l	w_2	α_2	n_2	K_s[cm d^{-1}]
0 – 10 cm	0.091	0.446	0.124	2.46	0.0232	0.918	0.0243	1.25	871
10 – 30 cm	0.266	0.446	0.0965	4.59	0.0159	0.839	0.0173	2.25	499
30 –200 cm	0.285	0.561	0.217	3.51	0.00161	0.917	0.0237	1.63	298

深さ	θ_r	θ_s	α_1	n_1	l	w_2	α_2	n_2	K_s[cm d^{-1}]
0 – 10 cm	0.024	0.446	0.0432	2.46	0.023	0.715	0.0494	1.25	330.0
10 – 30 cm	0.138	0.446	0.167	4.59	0.016	0.997	0.0173	2.25	685.0
30 –200 cm	0.270	0.561	0.196	3.51	0.002	0.568	0.0246	1.63	198.0

（B） 山口大学

深さ	θ_r	θ_s	α_1	n_1	l	w_2	α_2	n_2	K_s[cm d^{-1}]
0 – 10 cm	0272	0.527	0.077	3.87	0.133	0.889	0.0364	1.41	647.0
10 – 30 cm	0.000	0.502	0.084	2.05	3.440	0.882	0.0051	1.03	146.0
30 – 50 cm	0.170	0.536	0.021	1.98	2.980	0.566	0.0002	3.42	7.3
50 –200 cm	0.000	0.560	0.040	3.63	0.5	0.880	0.0054	2.92	107.0

深さ	θ_r	θ_s	α_1	n_1	l	w_2	α_2	n_2	K_s[cm d^{-1}]
0 – 10 cm	0.227	0.772	0.018	3.8	0.403	0.816	0.0471	1.34	402.5
10 – 30 cm	0.010	0.440	0.014	3.23	0.010	0.691	0.0054	2.70	1015.5
30 – 50 cm	0.083	0.468	0.024	2.03	2.982	0.566	0.0004	3.42	5.0
50 –200 cm	0.001	0.590	0.001	5.24	0.5	0.880	0.0090	2.92	38.3

Table 2 20 cm 深及び 40 cm 深の吸引圧の観測値と推定値間の RMSE.
The value of RMSE between observed and simulated suctions at the depths of 20 cm and 40 cm.

	山口県農林総合技術センター		山口大学	
	20 cm 深	40 cm 深	20 cm 深	40 cm 深
キャリブレーション期間	9.75 kPa	5.83 kPa	6.99 kPa	2.83 kPa
検証期間	5.8 kPa	4.01 kPa	7.56 kPa	8.55 kPa

場におけるキャリブレート後の水分特性パラメータを示す．山口県農林総合技術センター内圃場及び山口大学内の圃場の深さ 20 cm 深及び 40 cm 深の吸引圧の観測値と圃場モデルのシミュレーションにより得られた推定値を Fig. 5，Fig. 6 に示す．山口県農林総合技術センターの圃場モデルについては 20 cm 深の推定値が観測値より若干大きくなる傾向にあった．また，40 cm 深はキャリブレーション期間の 5，6 月頃の乾燥時期の再現性は低かった．どちらの圃場モデルも推定値と観測値に多少の乖離がみられるが，検証期間はキャリブレーション期間と気象条件が大きく異なっていたにも関わらず，両圃場とも土壌水分の変動傾向をよく再現出来ていた．Table 2 に 20 cm 深及び 40 cm 深の吸引圧の観測値と推定値間の RMSE を示す．どちらの圃場も RMSE は 10 kPa 以下であり，十分な精度で土壌水分状態を再現できたと判断し，これらの圃場モデルを将来予測に用いることとした．また，地下水位を 200 cm 以深とした仮定に関して，推定値は観測値をよく再現できていたため計算領域および下方境界条件は適当なものであったと判断した．

3.3 気象予測データの変動傾向

過去 10 年間分（2009 – 2018 年）の土壌水分の推定に用いたアメダス山口市地点の降水量及びポテンシャル蒸

Table 3 現在気候と将来気候における各季節の無降雨日の平均値と標準偏差.
Seasonal mean number and standard deviation of clear days in the present and the future.

無降雨日数	春	夏	秋	冬
現在	60.3 ± 4.5	56.5 ± 5.2	62.6 ± 5.6	51.9 ± 4.8
将来	58.3 ± 3.6	58.1 ± 7	57.7 ± 7.1	55.7 ± 5.2

発量と将来予測に用いた ELPIS-JP 内の 10 年間分（2081 – 2090 年）×10 時系列の降水量及びポテンシャル蒸発量を比較し，将来にかけての気象条件の変動傾向を調べた．Table 3 に現在気候と将来気候における季節毎の無降雨日の平均値を示す．なお，季節については 1 – 2 月，12 月を冬，3 – 5 月を春，6 – 8 月を夏，9 – 11 月を秋とした．現在と将来の無降雨日の日数を比較すると信頼度水準 5 % で秋の期間は有意に減少，冬の期間は有意に増加していた．一般に無降雨日の年間日数は将来にかけて増加すると予測されているが（環境省, 2014），本研究においては無降雨日の年間日数に差は見られなかった．Fig. 7 に現在と将来における各季節の降水量とポテンシャル蒸発量の平均値を示す．降水量は秋を除いて将来は現在よりも概ね減少する傾向にあり，年降水量は約 150 mm 減少していた．ポテンシャル蒸発量は春と夏の期間で減少傾向，秋と冬の期間は増加傾向にあった．正木ら（2018）は気候変動が水文循環に及ぼす影響の評価において内水等の割合が低い土地の蒸発散量については夏の期間は減少傾向，その他の季節は増加傾向にあることを報告しており，本研究のポテンシャル蒸発量の変動傾向と概ね一致していた．

3.4 土壌水分将来予測結果

山口県農林総合技術センター内圃場の将来予測結果の例を Fig. 8 の（a），（b）に示す．（a）が ELPIS-JP 内の時系列 2 の気象予測データを，（b）が時系列 12 の気象予測データを大気境界条件としたときの 2090 年の吸引圧の推定値である．時系列 2 においては 1 月から 5 月の期間で吸引圧が高く推移し，時系列 12 においては 6 月から 10 月の期間で吸引圧が高く推移している．前述の通り，ELPIS-JP は 50 時系列分の気象予測データにより変動性の幅を示しており，1 つの時系列は統計的に起こり得る気候シナリオの 1 つに相当するため，どの時系列を大気条件とするかにより，土壌水分の予測結果も変わってくる．Fig. 8 の（c）に山口大学内の圃場の時系列 2 における 2090 年の吸引圧の推定値を示す．Fig. 8 の（a）と比べると，両圃場とも同じ気象条件で計算を行ったが，山口県農林総合技術センター内圃場は 20 cm 深と 40 cm 深の吸引圧の差が山口大学内圃場に比べて大きい．この傾向は現在（2016 年 – 2018 年）の吸引圧の観測結果の傾向と同じであり，土壌種（土性）の違いによる水分移動の差異を表すことができたと考えられる．

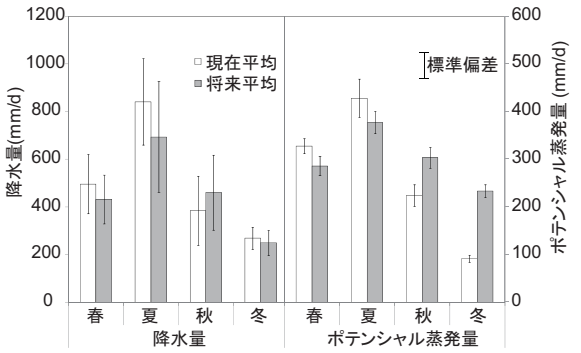


Fig. 7 現在と将来における各季節の降水量とポテンシャル蒸発量の平均値.
Seasonal mean precipitation and potential evaporation in the present and the future.

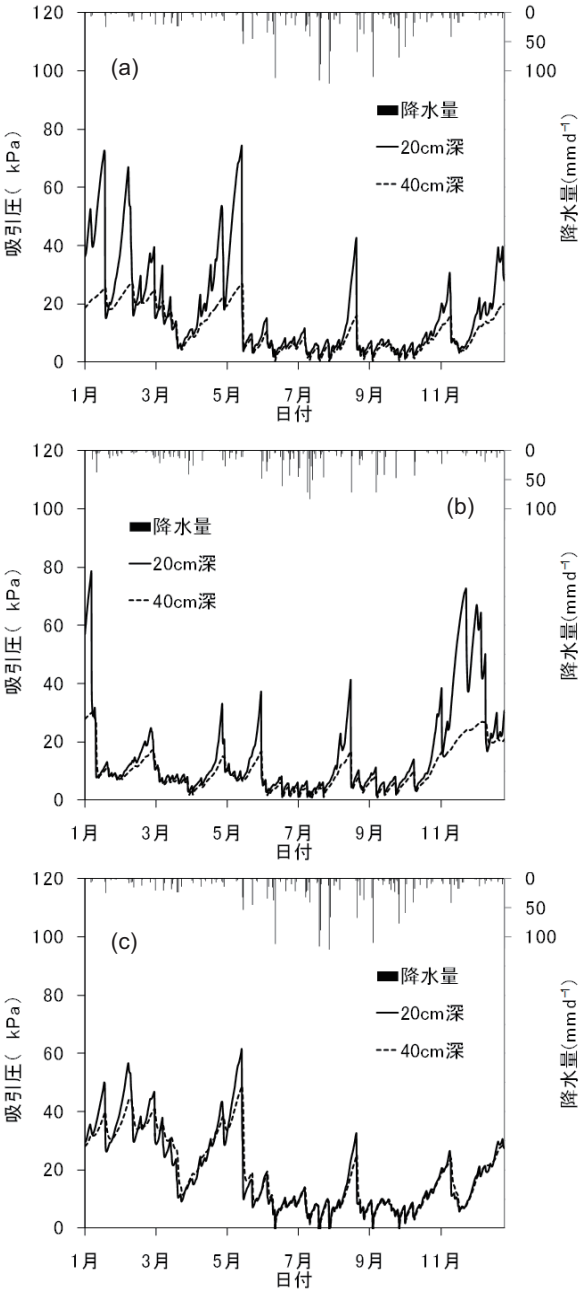


Fig. 8 2090 年の吸引圧の予測値の例. (a) 山口県農林総合技術センター内の圃場の時系列 2, (b) 山口県農林総合技術センター内の圃場の時系列 12, 山口大学内の圃場の時系列 2
Examples of predicted suctions in 2090.

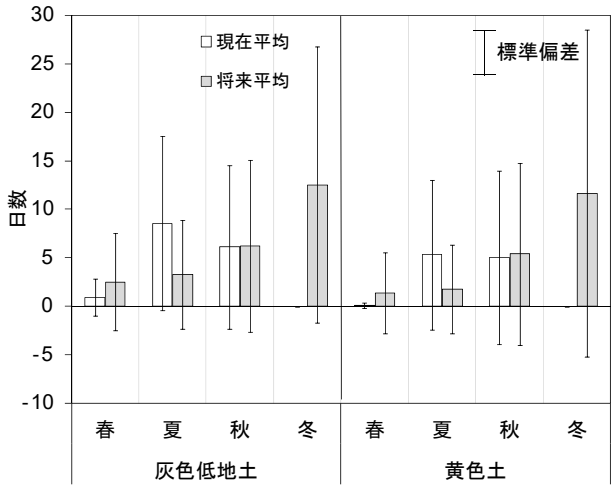


Fig. 9 20 cm 深の吸引圧が −49.1 kPa 以下となる日数.
Number of days when the soil at a depth of 20 cm becomes drier than −49.1 kPa.

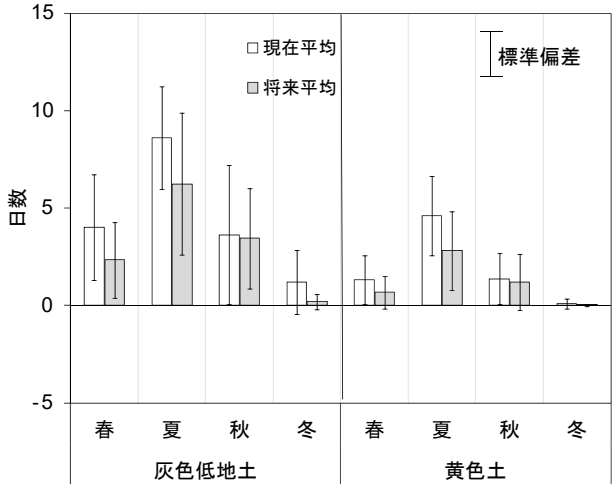


Fig. 10 20 cm 深の吸引圧が −3.1 kPa 以上となる日数.
Number of days when the soil at a depth of 20 cm becomes wetter than −3.1 kPa.

本研究では，吸引圧が −49.1 kPa 以下の乾燥状態となる日数及び圃場容水量を上回る（−3.1 kPa 以上）日数の現在平均と将来平均を季節ごとに比較することにより，気候変動が土壌水分へ与える影響を調べた．2009 年 1 月 1 日から 2018 年 12 月 31 日までの 10 年間の −49.1 kPa 以下となる日数及び −3.1 kPa 以上となる日数の年平均値を現在平均，2081 年 1 月 1 日から 2090 年 12 月 31 日までの 10 年間（10 時系列分）日数の年平均値を将来平均とした．Fig. 9 に各圃場の 20 cm 深の吸引圧が −49.1 kPa 以下となる日数の現在平均と将来平均を示す．現在平均と将来平均を比較すると，冬の期間においては山口県農林総合技術センター内圃場（灰色低地土），山口大学内圃場（黄色土）ともに 12 日程度増加しており，将来においては現在よりも冬の期間の乾燥が進むことが予想される．一方，夏の期間においては両圃場とも乾燥状態となる日数は現在の半分以下の日数に減少しており，将来においては夏の期間の干ばつは緩和されると予想される．春と秋の季節においては両圃場とも現在と将来でほとんど差は見られなかった．Fig. 7 より将来の冬の期間において降水量はほとんど変化していないが，ポテンシャル蒸発量が大きく増加したために乾燥状態となる期間が増加したものと考えられる．また，冬の期間の無降雨日の増加も土壌の乾燥日数の増加の要因の一つだと考えられる（Table 3）．夏の期間について，将来は降水量とポテンシャル蒸発量のどちらも減少しているが，降水量の減少よりもポテンシャル蒸発量の減少が圃場の水収支に大きな影響を与えたために乾燥状態となる日数が減少したと推察される．Fig. 10 に両圃場の 20 cm 深の吸引圧が −3.1 kPa 以上となる日数の現在平均と将来平均を示す．現在平均と将来平均を比較すると，両圃場とも春と夏の期間において圃場容水量を上回る日数が減少する傾向が見られた．これは春と夏の期間は降水量が減少傾向にあるために，土壌が過湿状態となる頻度が減少したからだと考えられる．加藤 · 西村（2015）は現在と将来の 1 か月間の最大降水量に着目し，将来は現在と比較して月最大降水量の増加が見込まれ，土壌水分が圃場用水量を上回る頻度が高くなる傾向にあることを報告している．加藤 · 西村の研究においては一か月間の降水量が最大となる時系列について将来予測を行っているが，本研究では無作為に抽出した時系列について年間を通した予測を行ったため，土壌が過湿となる頻度においては異なる結果になったと考えられる．

4. おわりに

本研究では，将来の気候変動下における山口市の畑地土壌の水分状態を予測し，気候変動による気象条件の変化が土壌水分に与える影響を調べた．まず，山口市の畑地圃場において 2 年間の土壌水の吸引圧を観測した．観測データをもとに HYDRUS-1D を用いて水分特性パラメータのキャリブレーションを行い，対象圃場の土壌水分移動をモデル化した．圃場モデルは気象条件の違いに関わらず実際の土壌水分移動をよく再現することができた．その後，キャリブレート後の圃場モデルの大気条件を ELPIS-JP の将来の気象データとし，複数の時系列において気候変動下における山口市内の畑地の土壌水分状態を予測した．予測結果について季節ごとに一定の吸引圧を超えるもしくは下回る日数で評価した．土壌が −49 kPa 以下の乾燥状態となる日数を現在と将来で比較すると夏の期間は減少し，冬の期間は顕著に増加することが示された．冬の乾燥については主に蒸発量の増加によるものであることが推察された．また，将来において土壌水分が圃場容水量を上回る日数については年間を通じて，両土壌種とも減少することが示され，湿害は緩和される傾向にあることが分かった．本研究では山口市内の畑地圃場を将来予測の対象とし，土壌種による将来予測の違いを比較したが，ELPIS-JP 内の他のアメダス地点の気象予測データを利用することにより，地域間での予測の違いも比較できると考えられる．今後の課題として，

本研究では土壌水分移動解析のみで土壌水分の将来予測を行ったが，気候変動が土壌環境へ与える影響を正しく評価するためには同時に熱移動解析を行う必要があることも報告されているため（Kato et al., 2011），熱移動解析も含めた土壌水分移動の検討が必要であると考えられる．また，GCM を用いた気候変動の影響予測は不確実性の影響を受けるため，今後より多くの種類の GCM や排出シナリオを用いた影響評価を行うことが望まれる．

謝辞

国立研究開発法人 農研機構・農業環境変動研究センターの飯泉仁之直博士には ELPIS-JP のデータ利用についてご助言を頂き，また同センターの桑形恒男博士にはポテンシャル蒸発量の計算についてご助言を頂きました．ここに記し，謝意を表します．

引用文献

Durner, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soil with heterogeneous pore structure. Water Resour. Res., 30(2): 211–223.

Iizumi, T., Semenov, M.A., Nishimori, M., Ishigooka, Y. and Kuwagata, T. (2012): ELPIS-JP: A dataset of local-scale daily climate change scenarios for Japan. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 370: 1121–1139.

飯泉仁之直, 林 陽生, 木村富士男 (2007): 温暖化後の冷夏と暑夏による日本の水稲生産への影響. 農業気象, 63(1): 11–23.

飯泉仁之直, 西森基貴, 石郷岡康史, 横沢正幸 (2010): 統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門. 農業気象, 66(2): 131–143.

環境省 (2014): 日本国内における気候変動予測の不確実性を考慮した結果について. http://www.env.go.jp/press/files/jp/25593.pdf.

Kato, C., Nishimura, T., Imoto, H. and Miyazaki, T.(2011): Predicting soil moisture and temperature of Andisols under a monsoon climate in Japan. Vadose Zone Journal, 10 :541– 551.

加藤千尋, 西村 拓 (2015): 農地土壌水分状態予測に向けた GCM 予測値の時間ダウンスケーリング手法の検討. 農村工学会論文集, 83(1): 11–19.

気象庁 (2017): 気候変動監視レポート. http://www.data.jma.go.jp/cpdinf/monitor/2017/pdf/ccmr2017_chap2.pdf.

近藤純正, 徐 健青 (1997): ポテンシャル蒸発量の定義と気候湿潤度. 天気 (Tenki), 44(12): 875–883.

正木隆大, 田中賢治, 田中茂信 (2018): 気候変動が日本の水文循環に及ぼす影響評価と要因分析. 水文・水資源学会研究発表会要旨集, 31.

農研機構 (2010): MeteoCrop DB. https://meteocrop.dc.affrc.go.jp/top.php.

Peters, A. and Durner, W. (2008): Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. Journal of Hydrology, 356: 147–162.

Šimůnek, J., Sejna. M., Saito, H., Sakai, M. and van Genuchten, M.Th. (2013): The Hydrus-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 4.17, HYDRUS software sSeries 3, p. 342. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA.

辰巳賢一 (2013): 気候変動が圃場における水稲生産に与える影響とその適応策に関する研究. 環境情報科学論文集, 27: 43–48.

要　　旨

本研究では，気候変動下における山口市の畑地土壌の水分状態を予測し，気候変動による気象条件の変化が土壌水分変動に与える影響を調べた．まず，山口市の畑地圃場において 2 年間の土壌水の吸引圧を観測し，観測データをもとに HYDRUS-1D を用いて対象圃場の土壌水分移動をモデル化した．その後，圃場モデルの大気条件を ELPIS-JP の将来の気象データとし気候変動下における山口市内の畑地の土壌水分状態を予測した．予測の結果，土壌が乾燥状態（−49 kPa 以下）となる日数を現在と将来で比較すると夏の期間は減少し，冬の期間は顕著に増加することが示された．冬の乾燥については主に蒸発量の増加によるものであることが推察された．また，将来において土壌水分が圃場容水量を上回る（−3 kPa 以上）日数については年間を通じて灰色低地土圃場，黄色土圃場ともに減少傾向にあることが示され，将来の山口市の畑地は現在よりも乾燥化する傾向にあることが予測された．

キーワード：気候変動，土壌水分，HYDRUS，将来予測，ELPIS-JP