J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 151 p.61 ～ 67 (2022)

ダイズ圃場における土中水分・ガスの時空間変動と作物生育

濱本昌一郎 [1]

Spatio-temporal variations on soil moisture and soil-gas behaviors in soybean field, and link to crop growths

Shoichiro HAMAMOTO[1]

1. はじめに

1970 年代以降の米の生産調整を受けて水田の畑地利用が進んだ結果，転換畑は広く普及した（農林水産省, 2021）．転換畑ではダイズや野菜，ソバなどの生産が多い．普通畑に比べ，排水性が劣る水田転換畑では，梅雨期の降雨による圃場の土壌水分は容易に高まることから，過湿による出芽不良や初期成育の抑制が問題となっている．このような過湿条件下で生育したダイズは浅根化し，根系の発達が劣ることが指摘されている（Hirasawa et al., 1994）．また，開花期のダイズへの乾燥ストレスが，莢数や種子数の減少といった収量構成要素に影響を与えることが報告されている（新田見ら, 2013）．従って，作期中の土壌水分状態を把握し，作物生育や収量に及ぼす影響を明らかにすることは，ダイズ作において安定した収量を確保する上で重要である．しかし，一般に圃場は不均一であり，土壌水分は空間的にばらつく（亀山ら, 2019）．土壌水分の空間的変動の把握には多大なコストを要し，ダイズ圃場の土壌水分の時空間的変動が，作物生育や収量に与える影響について体系的に検討した例は少ない．

近年，圃場作物や土壌サンプルを用いたマルチオミクス解析（各種オミクスデータを用いた網羅的解析）により植物－微生物－土壌に関する農業環境データを取得し，統合情報解析により単独解析では見えない有用な情報を抽出する試みが見られる．例えば Ichihashi et al.（2020）では，有機農法の一つである太陽熱処理を行ったコマツナ圃場に対して，マルチオミクス解析を行った．その結果，作物収量と関係性がある測定項目として，一部のアミノ酸などの有機態窒素（アラニンやコリン等）やある種の根圏細菌が含まれ，特に土壌中の有機態窒素がハブノード（他の測定項目と多く相関関係を形成している測定項目）として存在することを示唆した．マルチオミクス解析は，作物生産技術等を科学的に形式知化する新しい手法であり，今後の農学分野における活用が期待されている．一方で，このようなマルチオミクス解析に現場観測で得られた土壌物理量の時系列データを活用する試みは少ない．

土壌物理量の時系列データの中で，土壌ガス環境は主として土壌呼吸（土壌微生物呼吸および根呼吸）および大気とのガス交換によって支配される．土壌ガス環境の数値解析モデルに組み込まれる，土壌微生物呼吸・根呼吸速度やガス移動係数（ガス拡散係数や通気係数）といった，土壌，作物生育，微生物活性と関連の深いモデルパラメータは上記マルチオミクス解析とも親和性の高い有益な情報と言える．しかし，土壌呼吸速度には複数の環境要因が関連し，土壌ガス移動に関する数値解析モデルは極めて複雑であるのに加え（例えば，Šimůnek and Suarez, 1993），ガス移動モデルを検証可能な連続的な土中ガスモニタリングデータが不足しているのが現状である．

本稿では，異なる資材を投与したダイズ圃場を対象として実施した土壌水分・電気伝導度・土壌ガスの観測データに基づき，次の解析事例について紹介する．①土壌水分・電気伝導度の時空間変動と土壌物理・化学的特性，作物生育，収量データとの関係，②同圃場の無施肥区および牛糞施用区で得られた深度別土壌ガスの観測データに対する土壌内酸素移動モデルの検証．

2. 調査地およびモニタリング項目

福島県農業総合センター内（福島県郡山市）のダイズ圃場を対象圃場とし，2019 年度および 2020 年度の 2 か年で調査を行った．圃場全体の大きさは約 70 m × 10 m で，圃場内に無施肥区，無栽培区に加えて，異なる計 17 種類の資材を投与した処理区を計 63 処理区（1 処理区：2 m × 2.2 m）設けた．内訳は，化成資材として，くみあい化成 500，有機質資材として，牛糞堆肥（北海園芸・グリーンプラント）および粒状・発酵鶏糞肥料（ごんの里）に加えて，民間企業から提供を受けた化成・有機物資材計 8 種類ならびに微生物資材計 6 種類である．なお，無施肥区と牛糞施用区は各 6 区，無栽培区およびその他資

[1] 東京大学大学院農学生命科学研究科．Corresponding author: 濱本昌一郎．
2021 年 11 月 29 日受稿　2022 年 2 月 25 日受理

材区は各 3 区設置した．63 処理区は長辺方向に 3 列になるように配置（3 列 × 21 処理区）した．加えて，2020 年度では，列外や列間に計 10 区の無施肥区を新たに設置し，圃場全体で計 73 区の処理区を設けた（内 3 区は無栽培区）．福島県の奨励品種である里のほほえみを栽培した．

対象圃場の各処理区（2019 年度：計 63 区，2020 年度：計 73 区）において，深さ 10 cm に土壌水分センサー 5TE（METER Group）を挿入し，播種日から収穫日にわたる全期間で体積含水率，電気伝導度，地温を測定した（30 分間隔）．なお，体積含水率は，対象圃場で採取した攪乱土壌を用いて，校正を行った．また，一部処理区（無施肥区，牛糞施用区など）の深さ 10 cm と 25 cm に NDIR 式 CO_2 濃度変換器（GMM221，濃度範囲 0 ～ 5 %，Vaisala），とガルバニ式酸素センサー（CAP-SO-210, Apogee）を埋設し，CO_2 濃度と O_2 濃度を 30 分間隔で計測した．これらセンサーはガス透過性を有するシリコーンシートでセンサー部を覆い，土壌水の浸入を防いだ．

開花期（8 月上旬）に各処理区から不攪乱土壌および攪乱土壌を採取した．不攪乱土壌を用いて，飽和透水係数，水分特性曲線を，攪乱土壌を用いて土粒子密度，粒径分布，土壌炭素 · 窒素含有量を測定した．同じく開花期に，ダイズ地上部の主茎長と，ダイズ葉のイオン成分と炭素 · 窒素含有量を測定した．収穫期（10 月末）には，作物体地上部から，主茎長，莢数，百粒重など作物生育や収量に関わるデータを測定した．加えて，子実中のイオン成分と炭素 · 窒素含有量を測定した．イオン成分の測定には ICP-OES（Optima7500，Perkin Elmer 社），ICP-MS（NexION-350, Perkin Elmer 社）を，炭素 · 窒素含有量の測定には元素分析装置（vario EL cube，エレメンター社）を用いた．

3. 土壌水分および電気伝導度の時空間変動と作物生育

Fig. 1 に 2020 年度の無施肥区における土壌水分の測定結果（実線：平均値）を示す．7 月から 8 月上旬までの梅雨時期では飽和水分量に近く湿潤であった．一方，8 月中旬以降は，台風や秋雨の影響で土壌水分が増減する一方，別途水分特性曲線より得られた pF 3 の体積含水率（≒ 0.3 $m^3\ m^{-3}$）を下回る乾燥時期も見られた．全 73 区の土壌水分変動は，無施肥区（Fig. 1）と同様な傾向が見られるものの，8 月中旬から 9 月上旬にかけて体積含水率が 0.15 程度まで低下する処理区も見られ，圃場内で大きくばらついた．

Lee and Kim（2017）は，山地斜面の約 8.5 km^2 の集水域内の計数十地点で得られた深度別土壌水分変動に対してクラスター解析を行って変動パターンを分析し，空間内の地形と変動パターンの関係について調べた．時系列データと作物生育との関係を調べる上で，時系列データのパターン分類は有効な手法と考えられる．そこで，本研究においても，Lee and Kim（2017）の手法に従い，土壌水分の時系列データに対してクラスター解析を行った．全 73 区の土壌水分時系列データに対して，時系列データ間の類似性をユークリッド距離から算出し，ユークリッド距離を基準距離として階層的クラスタリング手法の一つであるウォード法によって時系列データのクラスタリングを行った．Fig. 2 に各分類の時系列データの平均値と 1 週間毎の測定値の標準偏差をエラーバーとして示す．分類 1 の時系列データは，8 月以降の土壌水分が低く乾燥状態，分類 2 は栽培期間を通して湿潤気味であることが分かる．分類 4 は梅雨時期に飽和状態（≒ 0.6）近傍の湿潤状態にある一方で，8 月中旬以降体積含水率 0.3 を下回る乾燥時期も存在するパターンであった．このように，クラスター解析によって各処理区の時系列データを分類し，土壌水分変動の空間的不均一性を特徴づけることができた．

Fig. 3 左に土壌水分変動の分類番号の圃場内マップを示す．三列配置した処理区の内，右列を中心に分類 4 の水分変動パターンが多いことが分かった．Fig. 3 右にダイズ全重（g m^{-2}）の圃場内分布を示す．右列で全重は少なく，主茎長，総節数，百粒重などの作物バイオマスに関わる指標も右側の列で低かった（結果非掲載）．さらに，子実中のイオン濃度（カリウム，カルシム，マグネシウムなど）も右側の列の処理区で低く（結果非掲載），イオン吸収も抑制されていることがわかった．分類 4 の水分変動は，梅雨時期に湿潤で，8 月以降乾燥気味であることから（Fig. 2），過湿と乾燥ストレスにより生育不良となったことが考えられた．土壌の物理性測定から，右列は他の二列に比べて飽和透水係数が低く，乾燥密度および圃場容水量 ·pF 3 含水率が高い傾向が見られた（結果非掲載）．従って，列毎で特異的な水分変動パターンが得られた理由として，左列の深さ 1 m 近傍に暗渠が埋設されていることや，右列では土壌の透水性が低く排水不良の可能性が考えられる．

全 73 区で得られた電気伝導度の時系列データに対しても，土壌水分と同様にクラスター解析を行った．5TE センサーで得られたバルク電気伝導度（EC_a）は，同じ

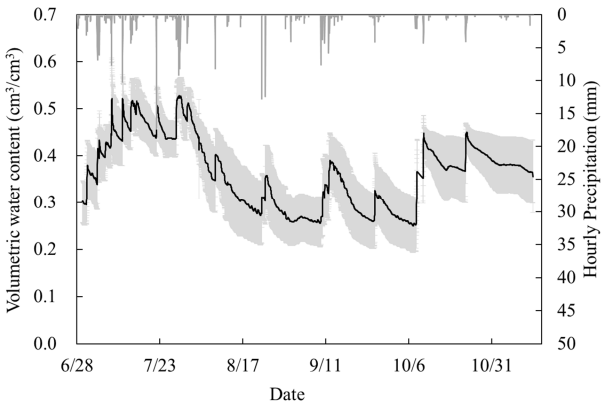


Fig. 1 無施肥区における土壌水分変動（灰色：標準偏差）．

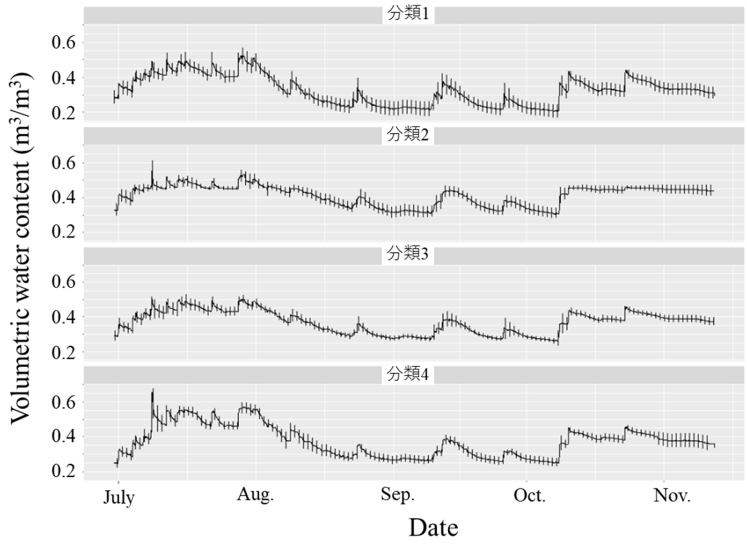


Fig. 2　全処理区における土壌水分変動のクラスター分類.

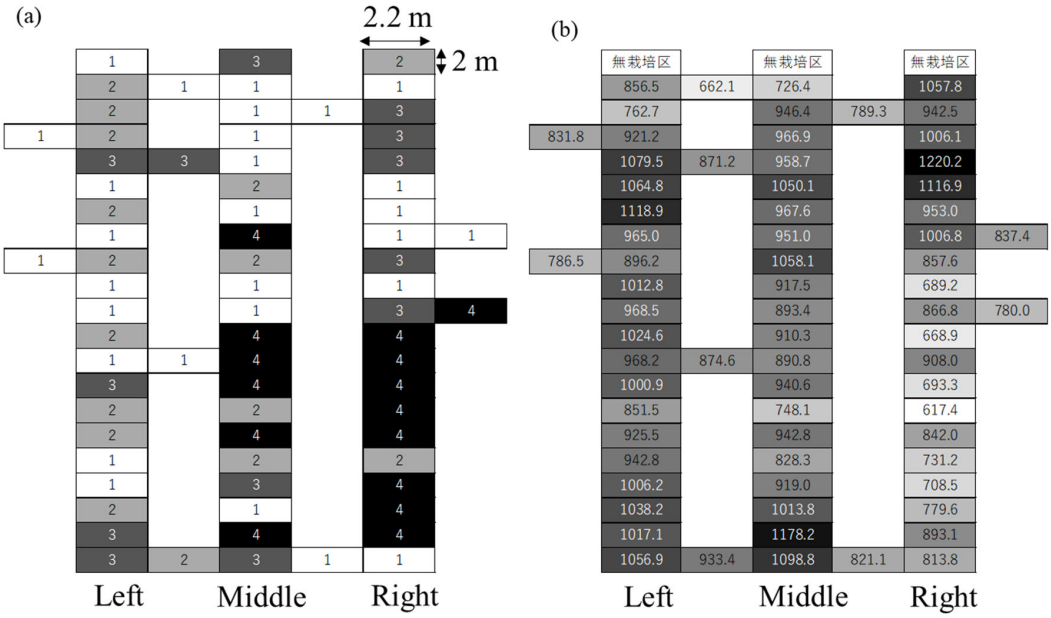


Fig. 3　(a) 土壌水分変動のクラスター分類および（b）ダイズ全重（g m^{-2}）の圃場内分布.

く 5TE センサー出力値の比誘電率（ε）と水の比誘電率（$\varepsilon_w = 80.3$）および乾燥土壌の比誘電率（$\varepsilon_0 = 6$: Meter Group, 2019）を用いて，Hilhorst モデルによって間隙水中の電気伝導度に換算した（Hilhorst, 2000）．電気伝導度の時系列データについては，栽培期間中ほぼ一定値を維持するパターンや，8 月以降上昇を示すパターンなど計 5 パターンが存在することが確認できた（結果非掲載）．特に生育が悪かった右列では，梅雨時期に電気伝導度は上昇する一方で，8 月中旬以降 0.25 dS m^{-1} 程度の値を維持するパターンを示す処理区が集中して分布することが分かった．

上記時系列データの分類パターンと作物生育との関連性を調べるために，10 月末，9 月末，8 月末，7 月末までの土壌水分の時系列データに対してクラスター分析を行い，各期間における土壌水分変動パターンの分類番号（分類 1 ～ 4）と収量構成要素との相関比を調べた．結果，7 月末までの土壌水分の分類パターンと茎の太さ，主径長，稔実莢数，全重，百粒重，精子実重 / 粗子実重，などの校正要素の間で高い相関比が得られた（例えば，茎の太さに対しては相関比 0.46）．土壌水分と電気伝導度の時系列データを 2 週間毎に平均し，機械学習におけるアンサンブル学習アルゴリズムであるランダムフォレ

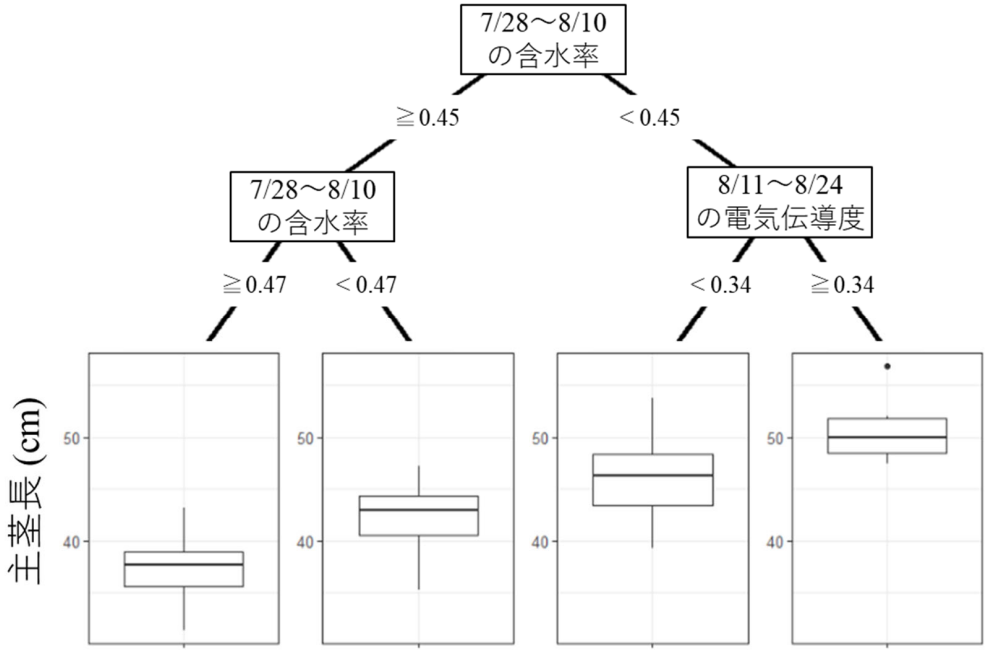


Fig. 4　主径長に対する回帰木分析．

ストを用いてこれらの期間別測定値と収量構成要素との関係について回帰分析を行い，収量構成要素に対して説明力の高い期間別測定値の抽出を行った．ここでアンサンブル学習とは，モデルの汎化性能を向上させるために，個々に学習した複数のモデルを融合させる手法である．解析は，統計分析ソフト R を用いて行った（金, 2017）．結果，7 月下旬から 8 月上旬の体積含水率や間隙水中電気伝導度が，主径長などのバイオマス生産に関わる収量構成要素に対する重要度の高い変数として選択された．選択された変数による回帰木分析の例として，主径長を対象とした解析結果を Fig. 4 に示す．Fig. 4 に示すように，7 月 28 日から 8 月 10 日までの平均含水率が上位のノードとして存在し，体積含水率 0.47 以上の場合に主茎長が最も短くなるグループとして分類された．一方で，7 月 28 日から 8 月 10 日の平均含水率が 0.45 以下でかつ 8 月 11 日から 8 月 24 日の間隙水中電気伝導度（平均値）が 0.34 dS m^{-1} 以上の場合，主径長が長くなることが確認された．圃場の乾燥が進む 8 月中下旬の電気伝導度が主茎長の増加要因として検出された結果は興味深い．

このように，土壌物理量の時系列データに対してクラスター解析を行うことで，圃場内の土壌水分および電気伝導度の空間的変動を特徴づけ，ランダムフォレストを用いることで作物生育や収量と紐づく説明力の高い変数を抽出することができた．

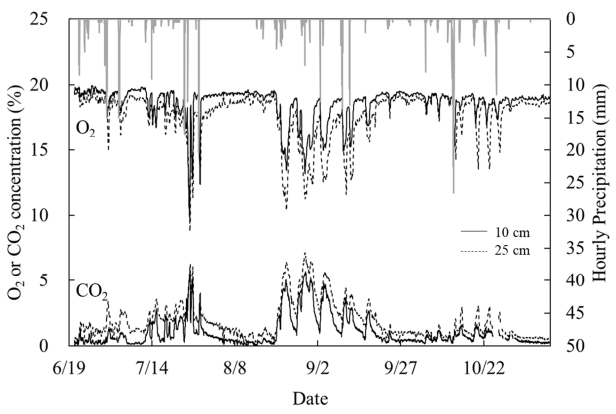


Fig. 5　無施肥区における深度別土中ガス濃度変動．

4. 土壌内酸素ガス動態とモデル検証

2019 年度に実施した当該圃場の無施肥区における深度別酸素 · 二酸化炭素ガス濃度変化を Fig. 5 に示す．25 cm 深は 10 cm 深に比べ O_2 濃度が低く CO_2 濃度が高かった．また，全期間を通して O_2 濃度と CO_2 濃度の変動は相補的であり，土壌呼吸の影響が見られた．8 月中旬から 9 月中旬では，降雨イベント時に大きな土中ガス濃度の変動が見られた．一方成熟期にあたる 10 月中旬以降は，降雨イベント時のガス濃度変動が低かった．従って夏期では，地温の上昇と根の生長に起因して土壌呼吸が活発であり，土壌水分上昇時に土壌呼吸が促進されたことが示唆された．小降雨期間（7 月末 ～ 8 月中旬，9 月末 ～ 10 月上旬）では CO_2 濃度が低く抑えられた．これは，乾燥状態で土壌ガスと大気のガス交換が促進されたことと，水分ストレスにより土壌呼吸が抑制されたためと考えられる．同年度の牛糞施用区は特に深度 25 cm で全期間を通して CO_2 濃度が高く，堆肥施用により土壌呼吸が促進されたことが示唆された（結果非掲載）．

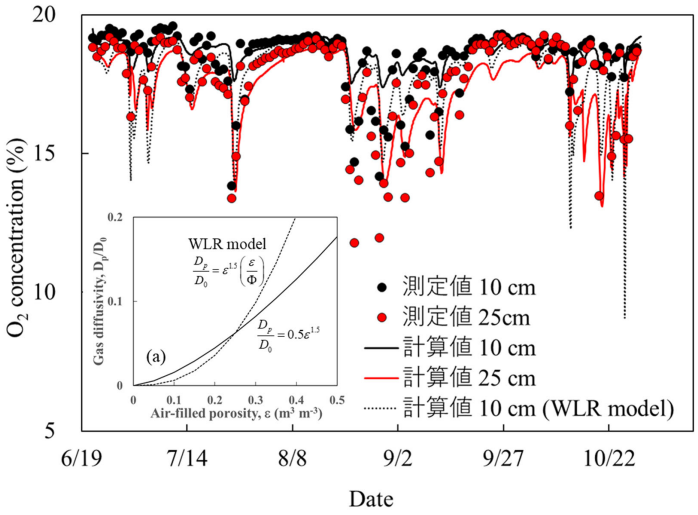


Fig. 6　(a) ガス拡散係数と気相率の関係、(b) 無施肥区における土中酸素ガス濃度の実測値および数値シミュレーション．

無施肥区と牛糞施用区で得られた酸素ガス濃度変化に対して一次元ガス移動モデルの検証を行った．数値解析は有限要素法により COMSOL Multiphysics ver. 5.6（COMSOL Inc.）を用いて行った．ガス移動モデルには，気相率および土壌呼吸速度への影響因子として地温を考慮する必要がある．そこでまず，リチャーズ方程式に Feddes の吸水モデルを考慮した支配方程式を用いて各処理区で得られた体積含水率（気相率）変動を再現した．当該圃場は深度 20 cm 程度に耕盤層が形成されていたことから，深度 20 cm を境界とする 2 層モデルとし，下端境界（深度 2 m）は自由排水境界とした．地表面境界としては，日降水量に加え，蒸発速度を与えた．FAO Penman-Monteith 法により求めたポテンシャル蒸発散速度に作期に応じた作物係数（農林水産省, 2015）を乗じ，ドローン撮影によって得られた被覆度を用いて土壌面蒸発速度と蒸散速度に分離した．現場から採取した深度別の不攪乱試料を用いて得られた飽和透水係数および間隙率をモデルパラメータとして与え，van Genuchten モデル（van Genuchten, 1980）の保水性パラメータをフィッティングパラメータとして扱った．Feddes の吸水モデルパラメータは Kato and Nishimura（2017）の値を採用した．熱移動については，水分移動と同じモデル領域に対して，地表面境界として日別気温を，下端境界としてゼロフラックス境界を設定し，熱伝導方程式を解いた．熱伝導率モデル（Chung and Horton, 1987）のモデルパラメータをフィッティングパラメータとした．

土中酸素ガス動態モデルは，O_2 消費（土壌呼吸）と移流，拡散による O_2 輸送によって表される．本研究では，降雨イベント時など体積含水率が上昇（気相率が低下）する際に生じると予想される空気のマスフロー（移流）を再現するため，気相率を考慮した空気に関するダルシー式を別に解き移流フラックスとして与えた．発生する土中内空気圧（大気圧との差圧）は栽培期間を通して最大でも 30 Pa 程度であり，水移動の計算には空気圧を考慮しなかった．ガス移動係数であるガス拡散係数（D_p, m^2 s^{-1}）と通気係数（k_a, μ m^2）については，現場から採取した不攪乱試料を用いて室内実験で測定し，気相率（ε, m^3 m^{-3}）の関数としてモデル化し数値解析に組み込んだ（$D_p/D_0 = 0.5\varepsilon^{1.5}$，$D_0$：空気中のガス拡散係数）．$O_2$ 消費速度は，土壌微生物呼吸 γ_s と植物根呼吸 γ_p の和によって表される．

$$\gamma_s = \gamma_{s0}\prod f_{si}, \qquad \gamma_p = \gamma_{p0}\prod f_{pi} \tag{1}$$

$$\prod f_{xi} = f_1(z)\, f_2(h)\, f_3(T)\, f_4\left(C_g\right) f_5(t) \tag{2}$$

ここで，式（2）中の x は s（土壌微生物）または p（植物根）を表す．また，γ_{s0}，γ_{p0} はそれぞれ土壌微生物，植物根由来のポテンシャル O_2 消費速度であり，最適水分量で 20 °C の条件における O_2 消費速度とされる．本数値シミュレーションでは，初期値として $\gamma_{s0} = 0.19$（mol m^{-2} s^{-1}），$\gamma_{p0} = 0.13$（mol m^{-2} s^{-1}）とした（Šimůnek and Suarez, 1993）．また f は，土壌微生物呼吸および根呼吸における制限係数である（$f_1(z)$：深さ，$f_2(h)$：土壌水分量，$f_3(T)$：地温，$f_4(C_g)$：O_2 濃度，$f_5(t)$：時間）．f_1 から f_5 までの各パラメータは次の文献値を引用した（f_1: Šimůnek and Suarez, 1993, Kato and Nishimura, 2017, f_2: Yan et al., 2018, Šimůnek and Suarez, 1993, f_3: Lloyd and Taylor, 1994, f_4: Šimůnek and Suqrez, f_5: Yang and Cai, 2006）．水分・熱移動と同じモデル領域に対して，地表面境界として大気境界を，下端境界としてゼロフラックス境界を設定した．

Fig. 6 に無施肥区における土中酸素濃度の実測値と数値解析結果を示す．但し，初期値の γ_{s0} および γ_{p0} を用いた数値解析では，根の呼吸の影響が小さいと考えられる播種後 1 か月以内の酸素濃度をよく再現できたものの，1 か月目以降の酸素ガス濃度を過小評価したため，根の最適呼吸速度 γ_{p0} を実測値にフィッティングさせた

（$\gamma_{p0} = 0.26$ mol m^{-2} s^{-1}）．数値解析結果は，土壌水分上昇による酸素濃度減少や，乾燥期間（播種後 40 ～ 60 日，8 月中旬）中の酸素濃度など，栽培期間中の深度別酸素濃度変化を概ね再現することができた．一方で，特に乾燥期間後の 8 月中旬から 9 月中旬にかけて，降雨イベント後の酸素濃度の低下を再現できず過大評価した．乾燥期間に死滅した微生物が基質として蓄積し，乾燥期間後の降雨イベントに対して土壌呼吸が促進するという報告（例えば，Schaeffer et al., 2017）があるように，微生物バイオマスの経時変化など土壌呼吸速度と関連する要因の把握が必要と考えられる．牛糞施用区についても，ガス移動モデルの検証を行った結果，γ_{s0} および γ_{p0} をそれぞれ初期値の 1.6 倍，2.5 倍とすることで，最も実測値を再現することができた（結果非掲載）．有機物を施用することで，土壌呼吸が促進したことが示唆された．一方で，無施肥区と同様に，乾燥期間後の 8 月中旬から 9 月中旬については酸素濃度を再現できなかった．本数値解析で用いた制限係数（f，式（1））は文献値を用いたものであり，環境要因と呼吸速度に関する実態把握が今後必要不可欠である．

また，ガス拡散係数モデルの違いが計算結果に与える影響を検討するため，気相率および全間隙率（Φ, m^3 m^{-3}）を関数とする Water Linear Reduction（WLR）モデル（$D_p/D_0 = \varepsilon^{1.5}(\varepsilon/\Phi)$，Moldrup et al., 2000）を用いた際の数値解析結果を Fig. 6 に示す．WLR モデルを用いた場合，べき乗モデル（$D_p/D_0 = 0.5\varepsilon^{1.5}$）に比べ，土壌水分増加時における酸素濃度低下は大きくなった．べき乗モデルと比べ，WLR モデルは低気相率（$\varepsilon < 0.25$ m^3 m^{-3}）条件でガス拡散係数が低くなる（Fig. 6）．従って WLR モデルを用いた場合，土壌水分の増加時に大気からの酸素供給が低下し，べき乗モデルと比べ土壌内の酸素濃度が大きく低下する結果が得られたと考えられる．WLR モデルは土壌中のガス拡散係数に関する研究の中でも高い適用性が報告されているものの（濱本 · 西村, 2014），現場の土中ガス濃度シミュレーションには適切なガス拡散係数モデルの選択が重要であることが確認できた．

5. おわりに

異なる資材を投与したダイズ圃場の土壌水分 · 電気伝導度の時系列データに基づき，クラスター解析を行った．得られた水分変動パターンの内，梅雨時期の過湿と 8 月以降の乾燥を示すパターンの処理区でダイズ生育が悪かった．また，ランダムフォレスト解析により作物生育データと関連性の高い物理量の抽出を試みた結果，特にバイオマス生産量に対する説明力の高い変数として，梅雨時期の体積含水率が挙げられた．土壌水分変動の空間的ばらつきを評価する上でクラスター解析は有効であり，本研究の手法は，今後作物生育に関わる他の測定値や微生物叢 · 代謝物データ（所謂マルチオミクスデータ）と時系列データとの関連を調べる上で活用できる．また，得られた時系列データを空間相関成分と残差（資材効果）に成分分離することで，子実品質への資材効果について今後調べる予定である．

土壌微生物および根の呼吸を考慮した移流拡散方程式を用いて，無施肥区および牛糞施用区で得られた深度別酸素濃度の時系列データを概ね再現することができた．一方 8 月中旬から 9 月中旬頃にかけて，降雨イベント後の酸素濃度の低下を再現できず過大評価した．対象土壌における呼吸速度と環境要因の関係について把握し，呼吸速度に関するパラメータチューニングが今後必要である．また，土中ガス移動における移流項や下端境界の取り扱いについては，室内ガス移動実験などを通してより詳細な検討が必要と思される．加えて，マルチオミクス解析における土中ガス濃度の時系列データの活用についても検討してきたい．

謝辞

本研究は，戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「スマートバイオ産業 · 農業基盤技術」（管理法人：農研機構生研支援センター），内閣府ムーンショット型農林水産研究開発事業（管理法人: 農研機構生研支援センター）を受けて行われました．データの収集および解析について，東京大学大学院農学生命科学研究科の西村 拓教授，小林奈通子准教授，福島大学食農学類の二瓶直登准教授，丹治克男特任農場管理員，福島県農業総合センターの平敏伸研究員，理化学研究所の鈴木健大研究員，福島敦史研究員（現京都府立大学 教授），市橋泰範バイオリソース研究センター チームリーダーには，多大なご尽力を戴いた．記して謝意を表します．

引用文献

Chung, S.O. and Horton, R. (1987): Soil heat and water flow with a partial surface mulch. Water Resour. Res., 23: 2175–2186.

Hilhorst, M.A. (2000): A pore water conductivity sensor. Soil Sci.Soc. Am. J., 64: 1922–1925.

Hirasawa, T., Tanaka, K., Miyamoto, D., Takei, M. and Ishihara, K. (1994): Effects of pre-flowering soil moisture deficits on dry matter production and ecophysiological characteristics in soybean plants under drought conditions during grain filling. Jpn. J. Crop Sci., 63: 721–730.

Ichihashi, Y., Date, Y., Shino, A., Shimizu, T., Shibata, A., Kumaishi, K., Funahashi, F,. Wakayama, K., Yamazaki, K., Umezawa, A., Sato, T., Kobayashi, M., Kamimura, M., Kusano, M., Che, F.S., O'Brien, M., Tanoi, K., Hayashi, M., Nakamura, R., Shirasu, K., Kikuchi, J. and Nihei, N. (2020): Multi-omics analysis on an agroecosystem reveals the significant role of organic nitrogento in-

crease agricultural crop yield, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, doi:10.1073/pnas.1917259117

亀山幸司, 宮本輝仁, 岩田幸良 (2019): 土壌水分計を用いた圃場内の水分分布測定に基づく 代表地点の選出. 農業農村工学会論文集, 309 (87-2): II_113–II_121.

Kato, C. and Nishimura, T. (2017): Predicting soil moisture condition in arbitrary agricultural lands using the digital soil map and soil physical properties database, Paddy Water Environ., 15: 159–169.

金 明哲 (2017): R によるデータサイエンス（第 2 版）. 森北出版.

Lee, E and Kim, S. (2017): Pattern similarity based soil moisture analysis for three seasons on a steep hill slope. J. Hydrology, 551: 484–494.

Lloyd J. and Taylor, J.A. (1994): On the temperature dependence of soil respiration, Functional Ecology, 8: 315–323.

Meter Group (2019): 5TE Manual, http://publications.metergroup.com/Manuals/20435_5TE_Manual_Web.pdf（2022 年 1 月 13 日）

Moldrup, P., Olesen, T., Gamst, J., Schjonning, P., Yamaguchi, T. and Rolston, D.E. (2000): Predicting the gas diffusion coefficient in repacked soil: Water-induced linear reduction model. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 1588–1594.

農林水産省 (2015): 土地改良事業計画設計基準計画 農業用水（畑）, https://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/tyotei/kizyun/kizyun.html（2021 年 11 月 19 日）

農林水産省 (2021): 大豆をめぐる事情. https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/（2021 年 11 月 19 日）

Schaeffer, S.M., Homyak, P.M., Boot, C.M., Roux-Michollet, D. and Schimel, J.P. (2017): Soil carbon and nitrogen dynamics throughout the summer drought in a California annual grassland. Soil Biology & Biochem., 115: 54–62.

新田見浩由, 佐藤朋和, 松波寿典, 伊藤亮一, 池田 武 (2013): 開花期の水ストレスが異なる伸育型ダイズの収量および収量構成要素に及ぼす影響, 日本作物学会紀事, 82: 141–149.

Šimůnek, J. and Suarez, D.L. (1993): Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 1. Model development, Water Resources Research, 29: 487–497.

濱本昌一郎, 西村 拓（2014）: 古典を読む R.J. Millington and J.R Quirk 著「多孔質媒体中の物質移動」. 土壌の物理性, 128: 39–46.

van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J.,44: 892–898.

Yan, Z., Bond-Lamberty, B., Todd-Brown, K.E., Bailey, V. L., Li, S., Liu, C.Q. and Liu, C. (2018): A moisture function of soil heterotrophic respiration that incorporates microscale processes, Nature Communications, doi: 10.1038/41467-018-04971-6

Yang, L.F. and Cai, Z.C. (2006): Soil respiration during a soybean-growing season, Pedosphere, 16: 192–200.