J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 156 p.77 ～ 80 (2024)

湿害指標としての土壌酸素濃度の経時変化傾向

坂口 敦 [1]

Temporal changes of soil oxygen concentration as an indicator of the wet damage

Atsushi SAKAGUCHI[1]

1. はじめに

湿害とは根域土壌が過湿になり土壌酸素濃度が低下した結果として作物が受ける生育阻害の総称である．湿害には酸欠に伴う根の吸水能力の低下以外の現象も含まれるが，本資料では根の吸水能力の低下に焦点を絞って土壌酸素濃度の低下が作物に与える湿害の経時変化と，降雨および灌漑に伴う土壌酸素濃度の経時変化について紹介する．まず，作物が受けている湿害の程度を経時的に観測する方法は確立していない．作物学分野では湿害程度の指標に収穫量が用いられる事が多いが，収穫量では湿害発生時に何が起きていたのかがブラックボックスとなってしまう．正規化植生指数（NDVI）や SPAD 値を指標とした経時的な湿害観測もなされているが，それらの値に変化が現れるまでには比較的長期間の日数が必要であり，作物が受けている湿害の程度を日単位で観測する為には他の指標が必要である．そこで，確立した方法ではないが，本資料では湿害を経時的に観測する為の指標として気孔コンダクタンスを使用する．植物は根の吸水速度が低下すると葉の気孔コンダクタンスを下げて蒸散速度を低下させ枯死を免れるため，気孔コンダクタンスは土壌の乾燥に伴う根の吸水速度の低下や葉の蒸散速度の低下を観測する為の指標として使用されてきた．湿害においても酸欠により根の吸水能力が低下するに従って，枯死を免れるために蒸散速度を低下させるべく気孔コンダクタンスを下げる反応は共通しているものと考えられる．一方で，土壌サイドでは湿害が生じ得る条件を経時的に観測する事は容易であり，根域土壌の気相率をセンサーで経時観測する手法が多用され，また土壌酸素濃度をセンサーで経時観測する手法も用いられている．気相率を指標とする際は，気相率が低ければ土壌酸素濃度も低いはずであり，根が酸欠状態であろうと仮定している．

以降，2 章ではグロースチャンバー内で観測した土壌酸素濃度とダイズの気孔コンダクタンスの関係，3 章では梅雨の降雨時に浅層暗渠整備済み圃場と未整備圃場で観測した土壌酸素濃度と気相率の関係，4 章では畝間灌漑時に膨潤性粘土圃場で観測した土壌酸素濃度と気相率およびそれらへの反応としてのトウモロコシの気孔コンダクタンスの関係を紹介する．

2. 土壌酸素濃度と気孔コンダクタンスの関係

グロースチャンバーを用いてダイズ（品種：サチユタカ）を栽培し，10 cm 深の土壌酸素濃度とダイズの気孔コンダクタンスの関係を観測した結果を Fig. 1 に示す．土壌酸素センサーには（MIJ-03，日本環境計測株式会社）を使用し，気孔コンダクタンスはリーフポロメータ（SC-1, METER group）を用いて毎日 11 時に展開葉を 3 葉計測して平均した．出芽から 15 日目に土壌を充填したコンテナの底面から給水して地表面まで湛水し，9 日間湛水を維持して，その翌日にコンテナ底面から重力水を排水した．グラフ内の◯は湛水開始の 5 日前（出芽 10 日後）から湛水終了日（出芽 23 日後）までの土壌酸素濃度が低下してゆく過程（Decreasing）の気孔コン

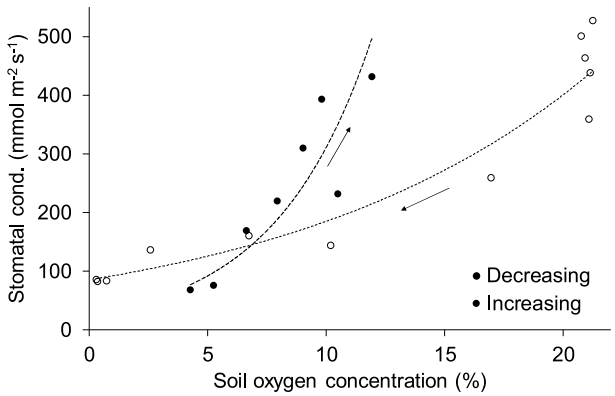


Fig. 1　土壌酸素濃度とダイズの気孔コンダクタンスの関係.
Relationship between soil oxygen concentration and stomatal conductance of soybean.

[1]The College of Agriculture, Ibaraki University, Ami 300-0393, Japan.
Corresponding author: 坂口 敦, 茨城大学農学部地域総合農学科
2024 年 1 月 15 日受稿　2024 年 1 月 29 日受理

ダクタンスの日変化を示し，●は排水日（出芽 24 日後）からその 11 日後（出芽 34 日後）までの土壌酸素濃度が増加してゆく過程（Increasing）の気孔コンダクタンスの日変化を示している．土壌酸素濃度が低下してゆく過程と増加してゆく過程の双方において，土壌酸素濃度と気孔コンダクタンスの間には相関関係が見受けられる．湿害を酸欠に伴う根の吸水能力の低下のみで評価してよいならば，湿害はリアルタイムで観測する事が可能と言える．また，排水後の土壌酸素濃度が増加してゆく過程では，土壌酸素濃度が低下してゆく過程に比べてより少ない酸素濃度で同等の気孔コンダクタンスを示している．例えば気孔コンダクタンスが 300 mmol m^{-2} s^{-1} 以上を示す土壌酸素濃度は，酸素濃度が低下してゆく過程では 15 % 程度であり，酸素濃度が増加してゆく過程では 10 % 程度であった．湿害からの回復期には少ない酸素濃度でも根が吸水可能になったものと推測するが，この植物の低酸素濃度への適応と思われる現象の詳細は不明である．本実験では低酸素濃度条件の持続時間までは考慮していないが，降雨強度の弱い長雨からスコールへと降雨パターンが変化しつつある本邦においては，低酸素濃度条件の持続時間を変化させて土壌酸素濃度と気孔コンダクタンスを観測する事で，圃場整備や作物栽培に利用可能な湿害モデルを作成できる可能性がある．

3. 浅層暗渠圃場および未整備圃場における降雨時の土壌酸素濃度と気相率の関係

山口県長門市日置の浅層暗渠整備済み圃場（暗渠埋設深度 40 cm，埋設間隔 4 m）と隣接する未整備圃場の両圃場に土壌酸素センサー（MIJ-03，日本環境計測株式会社）と含水率センサー（EC-5, METER group）を埋設し，土壌酸素濃度と気相率の関係を経時観測した結果を Fig. 2 に示す．両圃場ではダイズ（品種：サチユタカ）を 2 条植えで畝立て栽培し（畝高 15 cm），土壌酸素センサーおよび含水率センサーの埋設深度は畝上面から 10 cm 深，

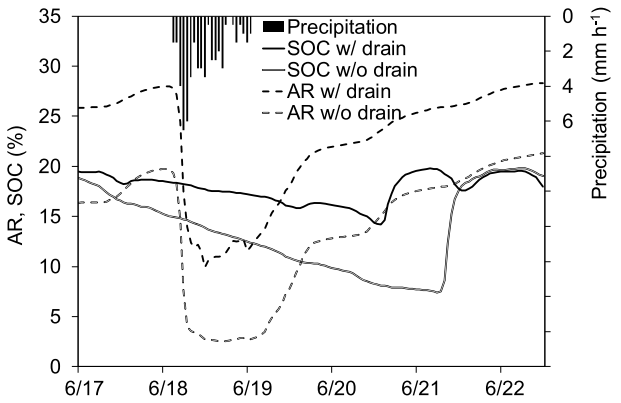


Fig. 2 降雨時の土壌酸素濃度 (SOC) と気相率 (AR) の関係.
Relationship between Soil Oxygen Concentration (SOC) and Air Ratio (AR) during and after the rainfall.

埋設地点は株間とした．含水率センサーは圃場当たり 6 地点に水平方向に埋設した．気相率は各含水率センサーの観測値が最大値のまま一定を維持した際の含水率と任意の含水率との差とし，6 地点分の値を平均して求めた．

2021 年 6 月 18 日に降った 51.0 mm の降雨に対し，浅層暗渠整備済み圃場（w/drain）においても未整備圃場（w/o drain）においても気相率（AR）は急速に低下し，浅層暗渠整備済み圃場では最低で 9.9 %，未整備圃場では最低で 2.5 % にまで低下した．一方で，土壌酸素濃度（SOC）はゆっくりと低下し続け，更に気相率が降雨の終了直後から増加し始めたのとは対照的に降雨終了後も低下し続け，浅層暗渠整備済み圃場では気相率の低下開始時刻の 59 時間後（2 日 11 時間後）に低限値の 14.2 %，未整備圃場では気相率の低下開始時刻の 75 時間後（3 日 3 時間後）に低限値の 7.4 % に達した．土壌酸素濃度が低限値に達した時点において，気相率は浅層暗渠整備済み圃場では 23.6 %，未整備圃場では 17.9 % にまで回復していた．低限値に達した後は気相率のゆっくりとした回復とは対照的に土壌酸素濃度は急速に回復し，浅層暗渠整備済み圃場では 9 時間後，未整備圃場でも 9 時間後に低下前の土壌酸素濃度にまで回復している．気相率は回復に長時間を要し，降雨開始直前の気相率にまで回復したのは浅層暗渠整備済み圃場では降雨終了の 75 時間後，未整備圃場では降雨終了の 66 時間後であった．この気相率の低下ピークと土壌酸素濃度の低下ピークの間のタイムラグについて要因を検討すると，まず両圃場の違いは浅層暗渠の有無でしかないがタイムラグの長さは異なるため，圃場の排水性が要因の一つであると言える．次に，気相率の低下は降雨浸潤に伴う土壌中の空気の排出により生じるのに対して，土壌酸素濃度の低下は気相率が低下して大気からの酸素の供給速度が低減した状態で酸素が徐々に消費されるために生じると考え，また気相率の回復は重力水の排水とそれに続く日々の日中の蒸発により生じるのに対して，土壌酸素濃度の回復は気相率の増加に伴う地表面からの空気の侵入により生じると考えると，土壌の間隙径分布，透気係数，有機物含有量，地温も要因であると推測される．

次に，土壌酸素濃度の低限値に対応する気孔コンダクタンスを Fig. 1 の酸素濃度低下過程（Decreasing）より推定すると，浅層暗渠整備済み圃場では湛水開始前の 5 日間の平均値である 458 mmol m^{-2} s^{-1} の 50 % 程度，未整備圃場では同値の 34 % 程度である．よって，酸欠（湿害）により根の吸水能が同程度まで低下した可能性がある．また，気相率の低下が 9.9 % までで留まった浅層暗渠整備済み圃場は，その後の土壌酸素濃度の低下も 14.2 % までで留まっている一方で，気相率が 2.5 % まで低下した未整備圃場は，その後に土壌酸素濃度が 7.4 % まで低下している．気相率は土壌酸素濃度の経時変化との間にタイムラグを有するものの，圃場の湿害の生じやすさを判定する指標にはなり得る．



Fig. 3 降雨 3 日後の浅層暗渠整備済み圃場.
The study field with underdrainage at the depth of 40 cm after three days from the rainfall.



Fig. 4 降雨 3 日後の浅層暗渠未整備圃場.
The study field without underdrainage after three days from the rainfall.

尚，6 月 16 日にも 24.5 mm の降雨があったため，土壌酸素濃度の低下は 6 月 16 日から始まっている．Fig. 3 および Fig. 4 は 2020 年 7 月 16 日 9 時に撮影した降雨 3 日後の浅層暗渠整備済み圃場および未整備圃場である．

4. 膨潤性粘土圃場における灌漑時の土壌酸素濃度と気相率の関係

熱帯サバナ地域に位置する州立農業試験場（オーストラリア国西オーストラリア州カナナラ）内の膨潤性粘土圃場に土壌酸素センサー（MIJ-03，日本環境計測株式会社），含水率センサー（EC-5, METER group），水ポテンシャルセンサー（TEROS 21, METER group）を埋設し，またリーフポロメータ（SC-1, METER group）を用いてトウモロコシの気孔コンダクタンスを計測した．得られた土壌酸素濃度，気相率，吸引圧および気孔コンダクタンスの経時観測値を Fig. 5 に示す．トウモロコシは 2 条植えで畝立て栽培し（畝高 15 cm），土壌酸素センサーの埋設深度は畝上面から 10 cm 深，埋設地点は株間とした．含水率センサーと水ポテンシャルセンサーは 2 地点の 10，20，30 cm 深に水平方向に埋設した．気相率は含水率センサーが観測した含水率の最大値と任意の含水率との差とし，2 地点分の値を平均して求めた．気孔コンダクタンスは 9 時から 15 時まで毎時に 3 葉目の展開葉を 5 葉計測した結果を日平均して示した．ここで，気孔コンダクタンス（g_s）が● g_s drip および□ g_s normal と 2 種類示されているが，200 m × 70 m の試験域内に設けた点滴灌漑区（15 m × 10 畝）で計測した気孔コンダクタンスが g_s drip であり，点滴灌漑区外で計測した気孔コンダクタンスが g_s normal である．2022 年 7 月 3 日に試験域全体に対して行った畝間灌漑以降，点滴灌漑区外は無降雨かつ無灌漑であり，点滴灌漑区内は株元へ点滴灌漑を行う事で 10 cm 深の吸引圧を −9.8 kPa から −15.5

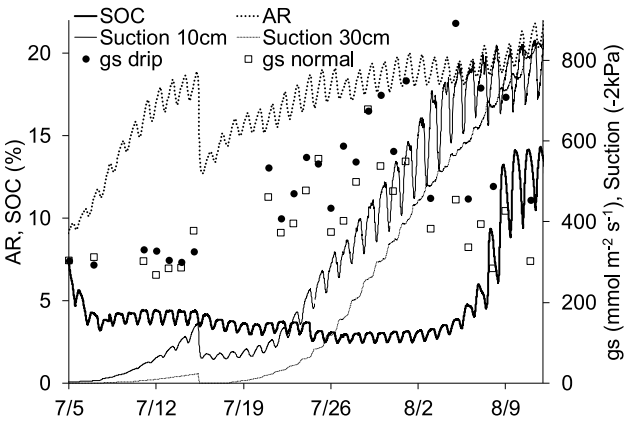


Fig. 5 畝間灌漑後の土壌酸素濃度 (SOC)，気相率 (AR)，吸引圧 (Suction) およびトウモロコシの気孔コンダクタンス (g_s) の関係.
Relationship among Soil Oxygen Concentration (SOC), Air Ratio (AR), Suction and stomatal conductance (g_s) of maize after the furrow irrigation.

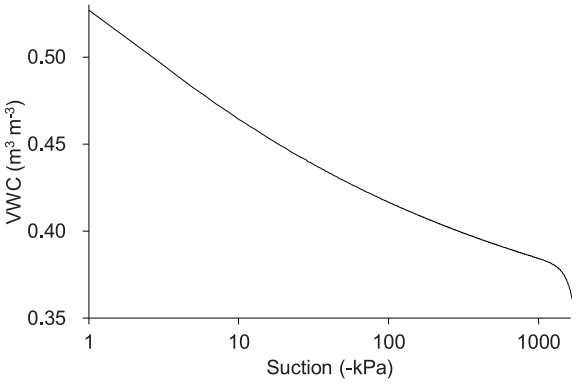


Fig. 6　10 cm 深土壌の水分特性曲線.
Water retention curve of soil at the depth of 10 cm.



Fig. 7　土壌の乾燥に伴い圃場に発生した亀裂.
Cracks in the study field occurred along with dryness of soil.

kPa の範囲内に維持した.

7 月 3 日の畝間灌漑以降，気相率（AR）は増加し続けた一方で土壌酸素濃度（SOC）は低下し続け，灌漑から 4 日後の 7 月 7 日 12 時台に土壌酸素濃度は 3.2 % に達した．以降も酸素濃度は昼間に 3.5 %，夜間に 4.2 % 程度を示しながら徐々に低下し続け，灌漑から 23 日後の 7 月 26 日には昼間に 2.4 %，夜間に 2.9 % 程度にまで低下した．その後は僅かな増加に転じ，灌漑から 33 日後の 8 月 5 日付近から急増を示した．Fig. 2 で示した浅層暗渠未整備圃場における降雨に伴う気相率低下のピークと土壌酸素濃度低下のピークのタイムラグは 3 日間であったが，それと比して約 10 倍の日数のタイムラグであった．土壌酸素濃度と気相率の観測深度は共に 10 cm であり，畝高も共に 15 cm である．膨潤性粘土圃場において土壌酸素濃度の回復に長期間を要した理由については，以下のように推測される．土壌酸素濃度が急増し始めた 8 月 5 日の 10 cm 深土壌の吸引圧は $-1,238$ kPa であり，直径 0.2 μm の間隙が有する吸引圧に相当する．ここで，10 cm 深土壌の含水率（VWC）と吸引圧（Suction）の観測値を SWRC Fit（Seki et al., 2023）を用いて dual-VG モデル（Durner, 1994）にフィッティングした水分特性曲線（$R^2 = 0.91$）を Fig. 6 に示すが，$-1,200$ kPa 付近から含水率が急減している事が分かる．よって，直径 0.2 μm の間隙に空気が侵入するのと同時に酸素濃度が回復したものと考えられる．逆に言えば，直径 0.2 μm の間隙が保持している土壌水が通気を妨げていたと考えられる．

次に気孔コンダクタンスについて，7 月 15 日までは点滴灌漑区（● g_s drip）も点滴灌漑区外（□ g_s normal）も値は低く平均で 308 mmol m^{-2} s^{-1} である．その後は点滴灌漑区も点滴灌漑区外も気孔コンダクタンスは増加し，点滴灌漑区においては 7 月 21 日から 8 月 11 日までの平均で 579 mmol m^{-2} s^{-1} となった．点滴灌漑区外においては，気孔コンダクタンスは増加した後に低下に転ずるが，点滴灌漑区外の吸引圧は比較的湿潤な 30 cm 深でも 7 月 23 日に -100 kPa を超えており，土壌の乾燥による気孔コンダクタンスの低下である．土壌酸素濃度が 3.5 % 未満であるにも関わらず気孔コンダクタンスが回復した理由については，土壌の乾燥に伴って発達した亀裂（Fig. 7）しか見当たらない．亀裂内には多数の根が見受けられた．しかし，亀裂が酸素を供給できている土壌の範囲は不明であり，本当に亀裂が根の酸欠状態の改善に寄与していたのかは分からない．何れにせよ，膨潤性粘土圃場においては，土壌酸素濃度を観測して湿害の指標とする事は適当ではないと考えられる．尚，土壌酸素センサーが観測した酸素濃度は亀裂の発達とは無関係に低下し続けているため，センサーは亀裂から酸素の供給を受けていないと判断できる．

引用文献

Seki, K., Toride, N. and van Genuchten, M.Th. (2023): Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties. J. Hydrol. Hydromech., 71(1): 22–34.

Durner, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Resources Research, 30(2): 211–223.