J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 157, p. 33～ 42 (2024)

若手特集
論　文
Original Paper

人工マクロポア内の土壌ガス濃度計測システムの構築および評価 — 局所耕うん法への適用 —

田崎小春 [1]・徳本家康 [2]・小宮秀治郎 [3]・登尾浩助 [4]

Development and evaluation of a soil gas measurement system for an artificial macropore —Application of the gas system to the shaft tillage method —

Koharu TASAKI[1], Ieyasu TOKUMOTO[2], Shujiro KOMIYA[3] and Kosuke NOBORIO[4]

Abstract: We developed a soil gas measurement system with a non-dispersive infrared CO_2 sensor, a low-flow pump, and solenoid valves, designed to assess variations in soil CO_2 concentrations within a macropore under specific cultivation conditions. The system's efficacy was evaluated through tests on the sensor's response to water vapor concentration, the system's airtightness, and the evaluation of CO_2 concentrations in a macropore, using standard gases as references. The system is proved to be effective in monitoring soil gas concentrations within a macropore over a range of CO_2 concentration from 400 to 7000 ppm and water vapor concentrations from 0 to 25 mmol mol^{-1}. Further investigations were conducted using a soil column packed with Andisol, incorporating an artificial macropore beneath a young seedling with drip irrigation. Our findings suggest that CO_2 gas emissions are influenced by preferential water flow, leading to increased water content at the macropore's bottom side, as determined by the water balance method.

Key Words: soil CO_2 gas, non-dispersive infrared CO_2 sensor, water vapor concentration dependence, preferential water flow

1. はじめに

土壌は，約 3.0 ～ 4.0×10^{15} kg の炭素量を土壌有機物として蓄えており，これは大気と植生の総炭素量の 2 倍に相当すると考えられる（Batjes, 1996; Weil and Brady, 2017）．農地における炭素貯留能への関心は高く（IPCC, 2019), たとえば近年ではバイオ炭の活用による農地の土壌炭素貯留量を増加（即ち，二酸化炭素（CO_2）放出量削減）させる試みなどが注目されている（久保田ら, 2024）. しかし，耕起方法や施肥方法などの圃場管理法や土壌環境により，農地からの CO_2 放出量は中長期的に変動することが予想される．このような土壌炭素貯留量の増減の実態把握およびモデル化には，土壌 CO_2 の連続的なモニタリングが欠かせないと考えられるが，土壌炭素貯留量の直接的な連続計測は困難である．

土壌中への炭素貯留量の増加対策の 1 つとして，農地への人工マクロポアの利用とその効果に関する報告がある．土壌に人工的に鉛直粗大間隙を作成し，その構造を維持するために繊維質材料を挿入することで，土壌水分の下方浸透の促進とそれに伴う土壌有機物の増加効果が示唆された（Mori et al., 2014; 岡ら, 2022）．しかし他方，人工マクロポアが土壌中の有機物分解を促進させる報告もある．例えば，Guo et al.（2018）は作物根や亀裂などの発達による粗大間隙の存在を想定したマクロポア（直径 4 mm，高さ 40 cm）をカラム土壌に作成し，マクロポア周辺土中の CO_2 濃度分布および地表面での CO_2 フラックスを計測した．マクロポアの有無の比較により，マクロポアの存在が土壌有機物分解速度と土中ガス拡散係数を増加させ，大気への CO_2 フラックスの増加を促進する効果が推察された．

不耕起栽培は，土壌保全の観点から注目された農法であり，耕起栽培に比べて土壌有機物の蓄積効果がより高い栽培法と位置づけられる（Unger and McCalla, 1980）．畑地における不耕起栽培では，表層土壌の緊密化により土壌の固相率，乾燥密度や貫入抵抗が増大するため（Heard et al., 1988; Roth et al., 1988），不耕起栽培用の農機具を用いて，播種溝や播種穴を形成させる手法が一般的である（松森ら, 2004）．不耕起栽培の播種および定植用の穴として，人工マクロポアを活用した事例もある．

これまでの不耕起栽培に対して，田島ら（2003）は人工マクロポア（直径 8 mm，深さ 360 mm）を露地栽培に適用し，人工マクロポアの上部へ苗を移植する部分耕起栽培法（局所耕うん法）を考案した．その特徴として，

[1]The United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University, 21-24, 1 Korimoto, Kagoshima 890-8580, Japan.
[2]Faculty of Agriculture, Saga University, 1 Honjo, Saga 840-8502, Japan. Corresponding author: 徳本家康, 佐賀大学農学部.
[3]Department of Biogeochemical Processes, Max Planck Institute for Biogeochemistry, Hans-Knoell-Str. 10, 07745 Jena, Germany.
[4]School of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan.
2024 年 4 月 22 日受稿　2024 年 7 月 6 日受理

土壌表面の不耕起被覆栽培による炭素固定量の増加効果や人工マクロポア内に作物根が伸長する密集根群が挙げられる（Lopez et al., 2013）．徳本 · 藤巻（2021）は，局所耕うん法の水分移動において，密集根群を介した局所的な水分下方浸透や吸水を明らかにした．しかし，土中の人工マクロポア内外における CO_2 ガス濃度の挙動ついては不明である．

土中の CO_2 の計測方法としては，土中に CO_2 センサーを埋設し，CO_2 濃度を連続的にモニタリングする手法が一般的である（遠藤ら, 2010; 加藤ら, 2013; 濱本 2022）．例えば，加藤ら（2013）は，ガス透過性フィルムとして厚さ 0.5 mm のシリコンシートを非分散型赤外線（NDIR）式 CO_2 センサーとガルバニ式 O_2 センサーの検知部に巻き付け，横 170 mm，縦 40 mm 寸法の小型チューブ埋設型土壌ガスモニタリングシステムを作成した．この方法は，土壌からガス透過性のチューブ内へのガス拡散現象を利用することにより，畑地土中の CO_2 濃度の長期的な連続計測を可能にした．濱本（2022）は，NDIR 式 CO_2 センサーおよびガルバニ式酸素（O_2）濃度センサーを圃場に埋設して，異なる施肥や作物栽培条件下における土中 CO_2 ガス濃度と O_2 ガス濃度を連続計測することで，土壌呼吸による土中 CO_2 ガスおよび O_2 ガスの相補的な変動を捉えた．このように，埋設型土壌ガスセンサーの利用により，土中ガス濃度の時系列データの取得が可能となり，降雨イベントへの応答や土壌呼吸などのガス動態の実態把握に有効である．

しかし一方，人工マクロポアのような土壌中の微小空間にセンサーを埋設することは不可能であり，人工マクロポア内の CO_2 ガス濃度変動を検討した事例はない．とくに，局所耕うん法の人工マクロポアを介したガス交換の有無や速度は，土壌炭素貯留量の増減に関与する重要な要因である．そこで本研究では，人工マクロポア内の土壌 CO_2 ガス濃度計測システムの構築およびその評価を目的とした．また，構築した計測システムの適用事例として，局所耕うん法の模擬土槽栽培実験を実施し，人工マクロポア内の CO_2 ガス濃度の変動を検討した．

2. 方法

2.1 構築した土壌ガス計測システム

2.1.1 土壌ガス計測システムの概略

本研究では，電磁弁を用いて土壌ガス流路を制御し，小流量ポンプを用いて土壌ガスを循環させることで，対象とする人工マクロポア内の CO_2 ガス濃度を一定時間間隔で連続計測できるガス計測システムを作成した（Fig. 1）．本システムには，NDIR 式 CO_2 センサー（GMP252, Vaisala 社），小流量ポンプ（TKA27-1-12, TOKIO Lab），2 方電磁弁および 3 方電磁弁（USB2，USB3，CKD 社），小型流量計（PF2M701，SMC 社）を用いた．気密性を高めるため，各部品を外径 4 mm のナイロン製チューブおよび金属接手（Swagelok 社）を用いて接続した．ナイロンチューブは耐屈曲疲労性に優れ，CO_2 ガス透過性はシリコーン材質の透過性に比べるとおよそ 10^{-5} 倍と低い（日本塑性加工学会, 1988）．各部品の動作の制御および CO_2 センサー，小型流量計の出力値の記録には，Campbell 社製のデータロガー（CR1000）を用いた．制御回路にリレーモジュール（Yosoo Health Gear 社）を組み込むことで，5 つの電磁弁（SV1 ～ 5）および小流量ポンプを設定時間間隔で切替可能にした．

2.1.2 土壌ガス計測システムの流路制御

本システムにおける流路制御の手順を以下に示す．人工マクロポアから CO_2 センサーの流路（Fig. 1 の実線矢印の流路）を開通する直前に，システム内部の初期ガス濃度を計測する．計測時間になると電磁弁 SV1 と SV2 が開き，ガス計測のための流路が開通する．電磁弁が開いた 1 秒後に小流量ポンプが作動し，人工マクロポア内の土壌ガスを循環させる．小流量ポンプを停止後，再度電磁弁 SV1 と SV2 を切り替えてシステム内の流路を閉鎖した状態でシステム内のガス濃度を計測する．人工マクロポア内の土壌ガス体積に加えて，SV1 から SV2 間の流路内のガスが 3 回循環することで流路内のガス濃度の均一化を想定し，小流量ポンプ（80 mL min^{-1}）の作動時間を設定した．

本システムを構成する CO_2 センサーは，電圧出力であるため，CO_2 標準ガスを用いて以下の校正式を求めた．

$$y_{CO_2} = 5.033V - 180.550 \quad (1)$$

ここで，y_{CO_2} は CO_2 ガス濃度（ppm），V は CO_2 センサーの出力電圧（mV）である．なお，本研究では有機物分解に伴う土中の CO_2 濃度の増減と比較するために，ガルバニ電池式 O_2 センサー（SO-110，APOGEE INSTRUMENTS 社）を用いて O_2 濃度を計測した．ガルバニ電池式 O_2 センサーも同様に電圧を出力する仕様であるため，O_2 標準ガスを用いて校正式を求めた．

$$y_{O_2} = 0.494V - 2.819 \quad (2)$$

ここで，y_{O_2} は O_2 ガス濃度（%），V は O_2 センサーの出力電圧（mV）である．本研究では，すべての実験において（1）式，（2）式を適用し，CO_2 および O_2 濃度を求めた．

2.2 水蒸気濃度依存性の実験

CO_2 センサーが異なる水蒸気濃度を含んだ同一の CO_2 標準ガスを測定することで水蒸気濃度依存性を評価した（Fig. 2）．予備実験により，人工マクロポア内の土壌 CO_2 濃度を想定して，5210 ppm の CO_2 標準ガスを選定した．供給する CO_2 標準ガスの流量は，CO_2 標準ガスボンベに取り付けた圧力制御器を用いて調整した．

水蒸気濃度調整法には，Reum et al.（2018）の水滴法（Droplet experiment）を用いた．乾燥した CO_2 標準ガスを脱イオン水で満した容器（Bubbling cell）に流すこと

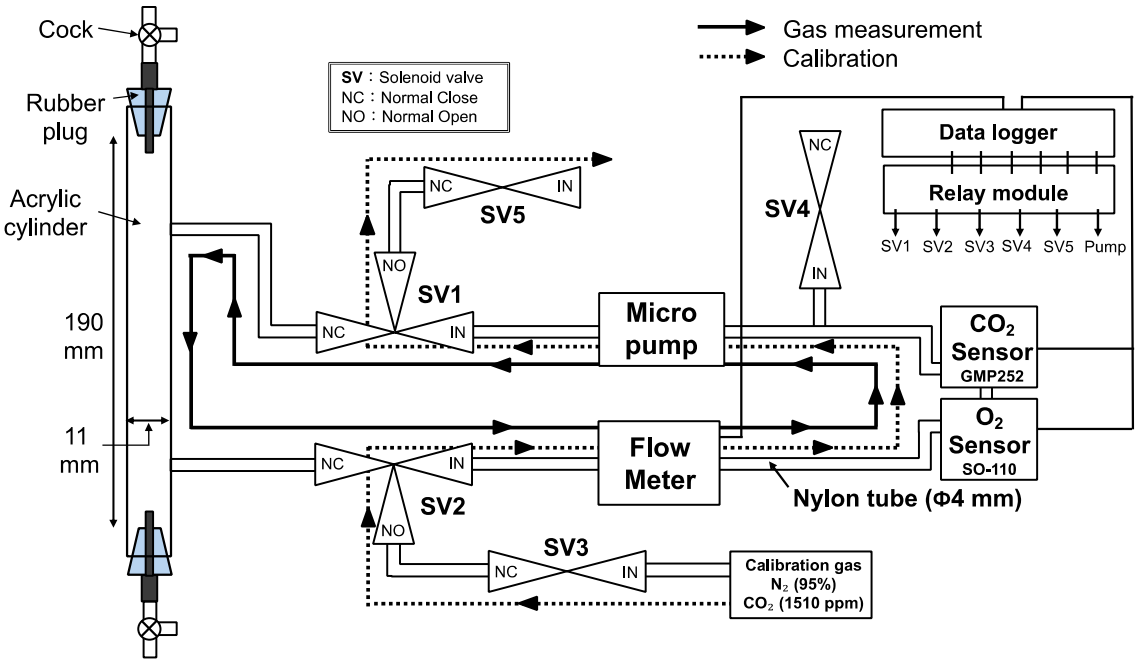


Fig. 1 土壌ガス計測システムの概略図.
Overview of our developed gas measurement system for an artificial macropore.

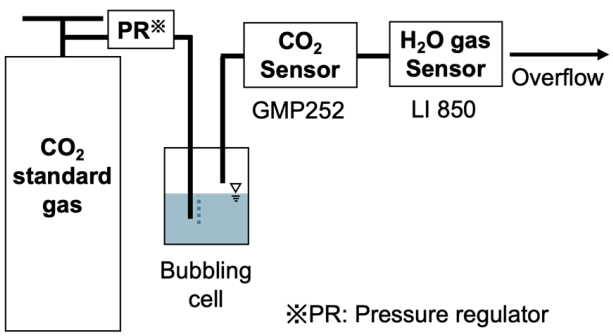


Fig. 2 CO_2 センサー（GMP252）の水蒸気濃度依存性評価の概略図.
Schematic figure of the water vapor independence test for CO_2 sensor (GMP252). .

で，バブリングにより生じた水蒸気を含む CO_2 ガスを作成した．本研究では，バブリング後の水蒸気量が減少する過程における CO_2 ガス濃度および水蒸気濃度を解析対象とした．水蒸気濃度の計測には，水蒸気計（LI-850, LI-COR 社）を用いた．同ガス流路には，NDIR 式 CO_2 センサー（GMP252，Vaisala 社）を設置し，CO_2 濃度を測定した．水蒸気濃度および CO_2 濃度はデータロガー（CR6，Campbell Scientific 社）を用いて 1 秒間隔で記録した．

2.3 気密性試験

室温 25 °C 一定の恒温室において，土壌ガス計測システム（Fig. 1）の流路 SV3 に接続したチューブ先端から 5 L の窒素ガス管（ケニス社）を用いて窒素ガスを注入することにより，ガス経路内の空気を追い出す「フラッシュ」作業を行った．フラッシュ後には，CO_2 濃度が 0 になったこと確認し，全ての電磁弁を閉じた．この時点を実験開始時刻とし，システム内の CO_2 濃度の経時変化を記録し，システム内への空気流入の有無を確認した．

なお，システムを構成する部品同士の継ぎ目には，シーリング剤として接着剤（ボンドクイック 30，コニシ社）および粘土パテ（家庭化学工業社）を用いて，空気の漏れがないように留意した．また，気密性試験における人工マクロポアを模擬したアクリル容器との接合部には，密着性を高めるため，シリコーングリス（信越化学工業社）を塗布し，同様にシーリング剤で加工した．

2.4 ガス濃度計測精度の評価

本システムによる人工マクロポア内の土壌ガス濃度の計測精度を評価する実験を実施した．人工マクロポア内の CO_2 ガス濃度（C_{CO_2}）は以下の式により算出した．

$$C_{CO_2} = \frac{C'\left(V_{pore} + V_{sys.}\right) - C_0 V_{sys.}}{V_{pore}} \tag{3}$$

ここで，C_0 および C' はそれぞれ，ポンプ作動前，ポンプ作動後の SV1 から SV2 間の流路内の CO_2 ガス濃度，V_{pore} は人工マクロポアの体積，$V_{sys.}$ は SV1 から SV2 間の流路内容積を表す．

土壌ガス濃度計測の精度を評価するため，5 つの異なる CO_2 濃度（0 ppm, 1510 ppm, 2305 ppm，4811 ppm, 7827 ppm）の標準ガスを用いた．ガス濃度の評価実験では，人工マクロポアを模擬したアクリル円筒容器（内径 11 mm，体積 20 mL）を本ガス計測システムに接続した．その後，アクリル円筒容器の三方活栓から，シリンジを用いて容器体積の 2 ～ 3 倍量の標準ガスを流した．

この状態で，本システムの流路を開通させ，小流量ポンプ（80 mL min^{-1}）を作動させたガス循環計測を実施した．小流量ポンプの作動時間は 2 分 30 秒とし，CO_2 の各標準ガス濃度につき 3 回反復計測した．

また，O_2 濃度（10, 20 %）の標準ガスを用いて同様の実験を実施した．(3) 式における C_0 および C' はポンプ作動前後の SV1 から SV2 間の流路内の O_2 ガス濃度として，アクリル容器内の O_2 濃度を算出した．標準ガス濃度と算出濃度の比較により，ガス濃度計測精度を評価した．

2.5 土槽栽培実験による人工マクロポア内の CO_2 ガス濃度計測

室温 25 °C 一定の恒温室において，土槽栽培実験による人工マクロポア内の土壌ガス計測を実施した（Fig. 3）．供試土に 2 mm 篩通過分の黒ボク土（熊本県合志市九州沖縄農業研究センター）を用いた．供試土の乾燥密度 ρ_b は，作土層における不撹乱土の ρ_b を参考に，0.82 Mg m^{-3} とした．飽和体積含水率 θs は，0.63 m^3 m^{-3} であった．また，供試作物にはチンゲンサイ（*Brassica chinensis L.*）を用いた．培土（サンブルーム社）を充填したセルポット（縦 25 mm，横 25 mm，深さ 45 mm）に播種後，十分に灌水した状態で，セルポットの表面から 50 mm 上部に設置した作物育成用ライト（FL20SBR-HG, NEC ライティング社）を用いて育苗した．栽培実験期間中，施肥は行わず，培土に含まれる養分のみで育苗した．

透明アクリル土槽（縦 270 mm，横 170 mm，奥行 50 mm）に風乾させた供試土を乾燥密度 0.82 Mg m^{-3} で均一に充填し，下端から圃場容水量（体積含水率 θ=0.45 m^3 m^{-3}）となるように蒸留水を供給した．その後，土槽下端のバルブを閉じ給排水が生じない条件で，室温 25 °C 一定の恒温室において 3 日静置した．この状態を初期条件とし，ドリルを用いて土槽中央に人工マクロポア（直径 10 mm，縦 200 mm，容積 15.5 mL）を作成した．

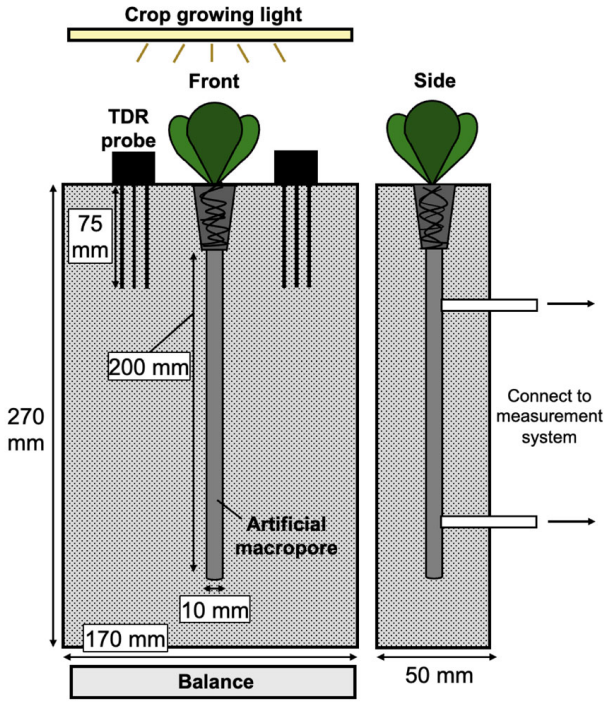


Fig. 3 土槽栽培実験の概略図.
Overview of cultivate experiment.

土槽前面には，構築した土壌ガス計測システムを接続するため，土壌表層から 70 mm および 170 mm の位置に直径 4 mm の穴を設けた（Fig. 3）．2 カ所の穴から同径で円筒状のステンレス棒を挿入し，人工マクロポアへ通じる横穴を作成した．横穴から人工マクロポアへ直径 4 mm ナイロンチューブを貫通させ，土壌ガス計測システムに接続した．チューブ接続の有無の判断のため，横穴から光ファイバー（ケニス社）を挿入し，人工マクロポア上方から横穴が人工マクロポアに通じていることを目視で確認した．また，アクリル土槽外部への土壌ガス漏れを防ぐため，アクリル土槽と土壌ガス計測システムの接合部に接着剤（ボンドクイック 30，コニシ社）および粘土パテ（家庭化学工業社）を塗り，土槽内外のガス移動がないように留意した．さらに，SV1 および SV2 の NC 側にガス透過性フィルター（タイベック，デュポンジャパン社）を挿入し，土壌ガス計測システム内へ土壌水分の流入を防止した．

チンゲンサイの定植部にはセルポットと同じ寸法の穴を作成し，育苗した苗を人工マクロポア上部に移植した．土壌表面は，苗の部分を除いてプラスチックシートで覆うことで，蒸散だけが生じる条件とした．水管理では，自動灌漑装置（PST-350，AGC テクノグラス社）を用い，灌水チューブ先端に取り付けた注射針から水を滴下した．栽培実験期間において，2.0 mm d^{-1} 程度の灌水を供試体の生育に応じて与える少量頻繁灌水とした．本研究では，苗を移植後 7 日経過してから CO_2 ガス濃度計測を開始した．本システムを用いた人工マクロポア内の CO_2 ガス濃度計測は，3 時間間隔で行った．また，土槽表層の土壌水分量の計測には，TDR 土壌水分計測システム（TDR100，Campbell Scientific 社）を用いた 75 mm 長の TDR プローブを鉛直方向に挿入し，土槽表層 75 mm の平均土壌水分量 θ_{75mm} を 15 分間隔で計測した．

3. 結果と考察

3.1 土壌ガス濃度計測システムの水蒸気濃度依存性

Fig. 4 に水蒸気濃度および相対湿度（RH）と CO_2 センサーによる CO_2 濃度測定値の関係を示す．CO_2 濃度測定値は水蒸気濃度の上昇に伴い有意に減少した（$r^2 = 0.85$）．これは，CO_2 標準ガスに含まれる水蒸気量が上昇したことで，希釈効果により CO_2 濃度測定値が見かけ上減少したためと考えられる．この希釈効果による CO_2 濃度測定値の減少は，Vaisala 社の工場出荷時に設定された湿度補正が十分でないことを示唆したが，土中の RH が 100 % 近いことを考慮すると避けられない結果と判断した．

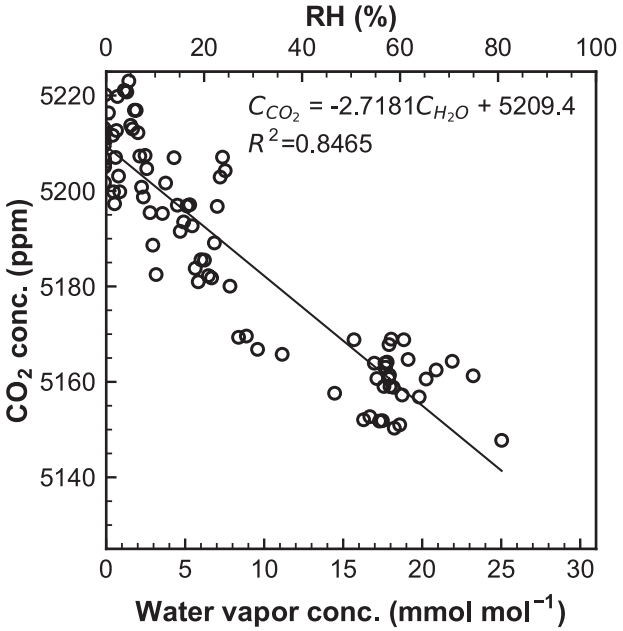


Fig. 4 水蒸気濃度（C_{H_2O}）および相対湿度と CO_2 センサー（GMP252）の濃度（C_{CO_2}）の関係.
Relationship between water vapor concentration (C_{H_2O}) and relative humidity and CO_2 concentration (C_{CO_2}) of GMP252.

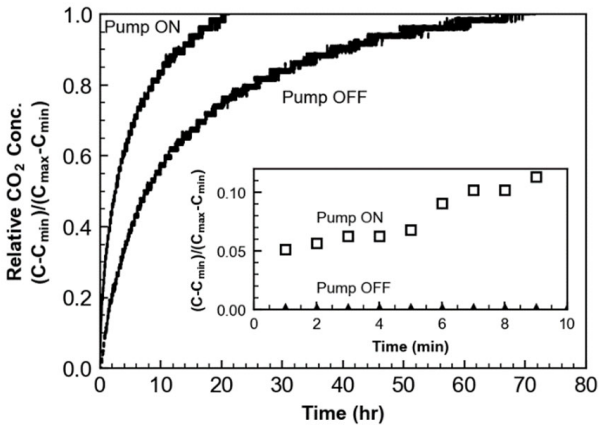


Fig. 5 N_2 フラッシュ作業後のシステム内の CO_2 相対濃度の経時変化.
Temporal changes in relative CO_2 concentration after N_2 flashing into the system.

本実験の水蒸気濃度依存性試験では RH 0.0 % ～ 80.7 % の範囲において検証したが，局所耕うん法における人工マクロポア内の RH は大気とのガス交換により，50 %（土中の 100 % 近い RH が大気の RH で低下する条件）よりも高い値で推移すると想定される．水蒸気濃度依存性試験において，RH 50 % から 80.7 % 間の CO_2 濃度測定値の平均値と 1 標準偏差はそれぞれ 5153.1 ppm と 8.3 ppm であった．GMP252 のマニュアル（Vaisala, 2018）によると，CO_2 濃度 3000 ～ 10000 ppm 範囲内における CO_2 濃度のバラツキの指標である確度誤差は ±2.0 % である．すなわち，CO_2 濃度 5153.1 ppm 測定時の確度誤差は ±103.1 ppm と推定された．これは水蒸気濃度依存性に伴う測定誤差（8.3 ppm）を大幅に上回った．そのため，水蒸気濃度依存性は，CO_2 センサーの確度誤差に比べて十分に小さく，無視できるものと本研究では判断した．

3.2 土壌ガス濃度計測システムの気密性

Fig. 5 は，N_2 ガスフラッシュ後におけるシステム内の CO_2 相対濃度の経時変化である．時間経過により，土壌ガス計測システム内の CO_2 濃度が上昇したため，システム内への大気流入が確認された．また，小流量ポンプ稼働の有無を比較した結果，ポンプ稼働ナシ条件では相対濃度が 0.5 になるまでに要した時間は 7 時間 10 分程度であった．一方，ポンプ稼働アリ条件では 2 時間 40 分程度であり，システム内への大気流入がより速いことが判明した．

ガスフラッシュ時において，ガス漏れ検知のために計測システムの継ぎ手に，ガス漏れ検出液（スヌープ）を塗布したが，ガス漏れは検知されなかった．しかし，GMP252 のガス感知部分のカバー（フロースルー）に関して，ガス漏れ点検や防止加工は困難であった．そのため，本システムを用いた土中の微小空間を対象としたガス濃度計測では，大気流入の影響を可能な限り小さくする計測時間の設定が必要と考えられた．本研究では，相対濃度変化が 0.05 程度と十分に小さく，流路内のガスが 3 回循環するのに要する時間を考慮して，ポンプ稼働時間を 2 分 30 秒とした．

3.3 土壌ガス濃度計測システムの測定精度

CO_2 ガス濃度の検証実験では，人工マクロポアを模擬したアクリル容器に注入した CO_2 標準ガス濃度と（3）式による実測値は概ね一致し，1 : 1 関係が成立した（Fig. 6a）．異なる標準ガス濃度で実施した 3 反復の計測における標準偏差は 65.22 ppm であった．これは，3.2 節で決定したポンプ稼働時間 2 分 30 秒により，システム流路内におけるガス濃度の均一化および大気混入の影響を抑制できたことを示唆した．

しかし一方で，CO_2 標準ガス濃度が高くなるほど，標準ガス濃度と実測値に差異が生じた．この原因として，GMP252 の確度誤差や経年劣化の影響（±60 ～ 300 ppm）が考えられる．とりわけ，経年劣化に関して，定期的な確認が推奨される（Vaisala, 2018）．Fig. 6 には，確度誤差および経年劣化の影響を考慮した値を破線で併記した．本実験で使用した最も高い CO_2 ガス濃度（7827 ppm）の確度誤差は ±157 ppm であり，経年劣化を考慮すると ±457 ppm の誤差が推察された．本研究では，CO_2 ガス濃度の測定範囲が 7000 ppm 以下であれば十分な測定精度を維持できると判断した．

本システムの O_2 ガス濃度測定精度評価においても，O_2 標準ガス濃度（10, 20 %）と本システムを用いた計測値の間に明瞭な高い相関関係が認められた．O_2 ガスセンサーの確度誤差は 0.76 % であり，実測値は確度誤差の許容範囲内であった．したがって，本システムを用いた O_2 ガス濃度計測も可能であると判断した．

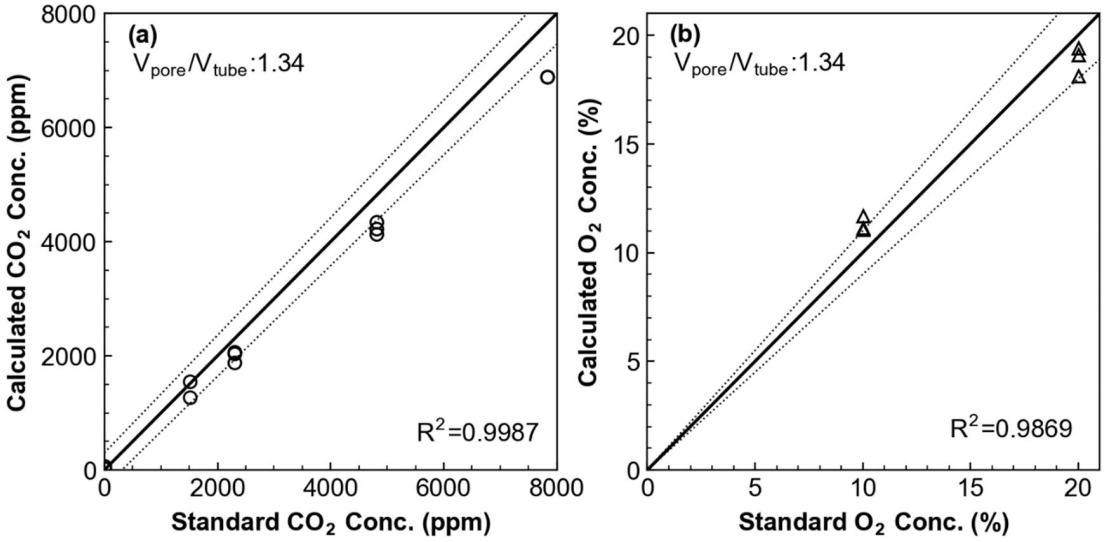


Fig. 6　標準ガス濃度と式（3）を用いて計算したガス濃度の関係．（a）CO_2 濃度，（b）O_2 濃度．
Relationship between standard gas concentration and calibrated concentration. (a) CO_2, (b) O_2.

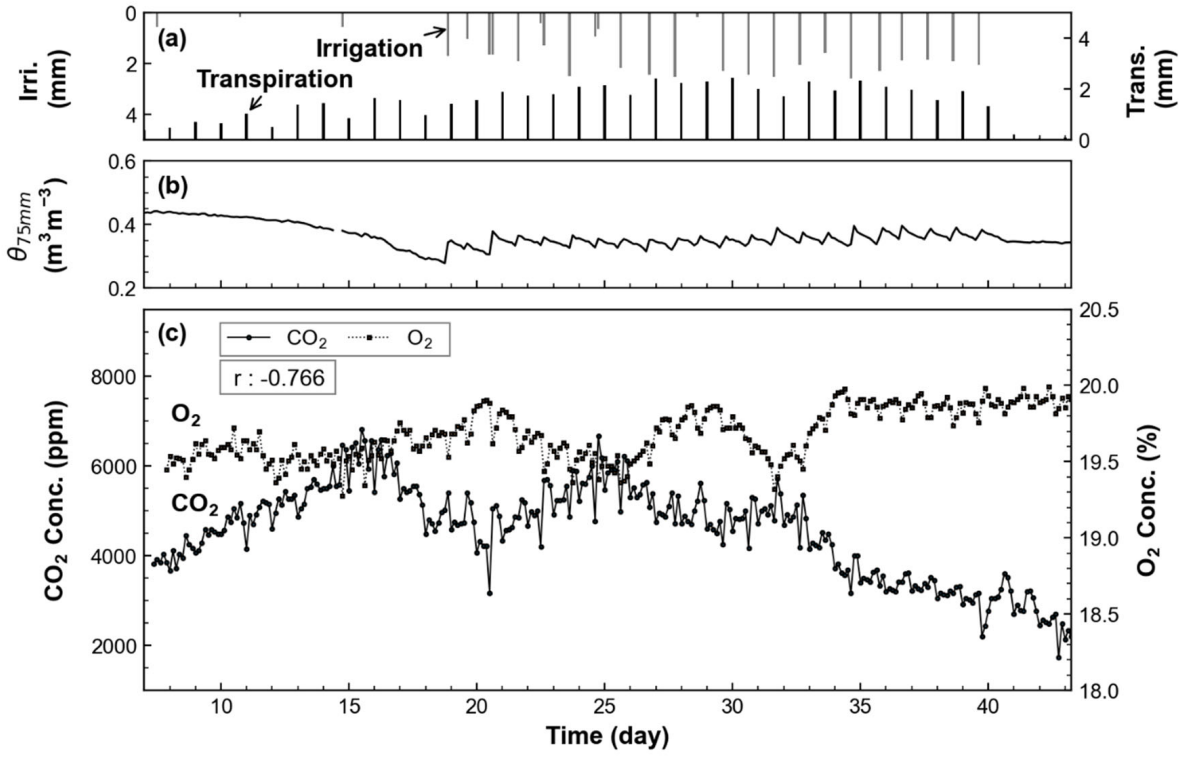


Fig. 7　土槽栽培実験期間中の（a）灌水量および蒸散量，（b）土槽表層 75 mm の体積含水率 θ_{75mm}，(c) 人工マクロポア内の CO_2 および O_2 ガス濃度の変化．
Temporal changes in (a) amount of irrigation and transpiration, (b) average water content at 75 mm deep of soil column and (c) CO_2 and O_2 concentration within the artificial macropore.

3.4 土槽栽培実験における人工マクロポア内の土壌ガス濃度

3.4.1 CO_2 ガスと O_2 ガスの挙動

土槽栽培実験において苗の移植後，チンゲンサイの生育は良く，良好な根の活着が確認された．栽培実験期間には，チンゲンサイの生育状況に応じて灌水量を 0.5 mm d^{-1} から 1.5 mm d^{-1} まで増加させることで（Fig. 7a），生育障害などは観察されなかった．日平均蒸散量は，チンゲンサイの生育に伴い 2 mm d^{-1} 程度まで増加した（Fig. 7a）．実験開始から 19 日まで灌水しなかった

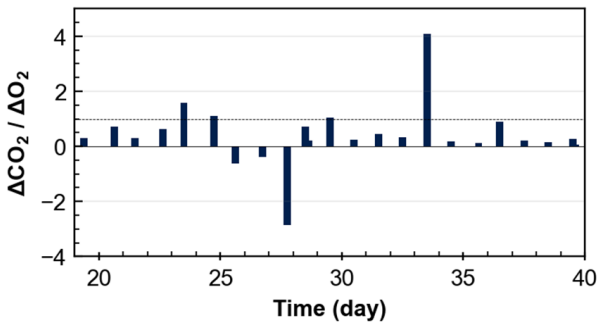


Fig. 8 灌水後 3 ～ 6 時間経過後の呼吸商（$\Delta CO_2/\Delta O_2$）の変化.
Change in respiratory quotient from 3 to 6 hours after irrigation.

ため，土槽表層 75 mm の平均土壌水分量 θ_{75mm} は初期条件 0.45 $m^3\ m^{-3}$ から 0.28 $m^3\ m^{-3}$ まで低下した．その後，灌水および蒸散により，0.35 $m^3\ m^{-3}$ 前後で変動した（Fig. 7b）.

Fig. 7c は，土槽栽培実験期間中の人工マクロポア内の CO_2 および O_2 ガス濃度の経時変化である．作物栽培条件下の人工マクロポア内の CO_2 ガス濃度は，実験開始時に 3825 ppm であった．少量頻繁灌水を実施する以前の 15 日において，日変動を繰り返しながら 6829 ppm まで上昇する傾向がみられた．灌水を開始した 19 日以降には，1735 ppm から 6670 ppm までの範囲で周期的な増減変動が生じた．人工マクロポア内の O_2 ガス濃度は，19.3 % から 20 % の範囲で変動した.

少量頻繁灌水期間に着目すると，人工マクロポア内の CO_2 と O_2 ガス濃度の相関係数 r は −0.766 であり，相補的な変動を示した．このような負の相関は，土壌微生物などが O_2 を消費し，CO_2 が増加するためと考えられる．たとえば，土壌 CO_2 ガス濃度変動の評価指標として，微生物呼吸による O_2 消費量に対する CO_2 発生量の比（呼吸商：$RQ = \Delta CO_2/\Delta O_2$）がある（遅沢ら, 1989）．畑地のような好気土壌条件や畑地表層では，呼吸商が 1 程度と報告されている（広瀬 · 熊田, 1967 ; Hodges et al, 2019）．Fig. 7c の計測値に基づき，点滴灌漑後の 3 ～ 6 時間で求めた呼吸商を Fig. 8 に示す．呼吸商の値は 1 よりも低い値で推移し，マイナス値も生じた．微生物呼吸において，呼吸商が −2 となるのは外れ値とみなし，計算した呼吸商の平均値は 0.51 であった（測定回数 $n = 24$）．本実験のように，気相率の高い条件下（気相率 = 43.87 %）において，呼吸商が 1 にならない理由として，大気ガスの流入や土壌水への CO_2 ガスの溶解および灌水に溶存した O_2 ガスによる酸素供給の影響が考えられる．呼吸商が 1 にならない圃場計測の報告例として，遅澤（1998）は土壌表層における大気混入の影響を示唆した．局所耕うん法における土壌ガス動態の要因には，人工マクロポア周辺土壌から発生する土壌ガスの拡散も考えられるため，ガス動態のより詳細な検討は今後の課題である.

無灌水期間（15 日 ～ 19 日）において，供試作物の蒸散に伴い θ が 0.35 $m^3\ m^{-3}$ 程度まで低下したことにより，土壌微生物による CO_2 ガス発生が抑制されたと推察される．それに対して，上述した少量頻繁灌水期間の 25 日までは，灌水による θ 増加に伴い，CO_2 ガス濃度の増加が生じた．25 日以降の CO_2 ガス濃度の減少傾向について原因は不明である．ただし，局所耕うん法では，土壌表層からの均一な下方浸透ではなく，密集根群を介した局所的な下方浸透および根の吸水による不均一な水分分布も人工マクロポア周辺の CO_2 ガス発生量に影響すると考えられる.

一方で，大気中の O_2 ガス濃度 21 % と比べて，人工マクロポアの O_2 ガス濃度は土壌中であるにも関わらず，高いのが特徴である．人工マクロポア上部には培土に根が密集した根巻き土壌が存在し，根巻き土壌を介した大気と土壌ガスの交換が生じるためと推察された.

3.4.2 水収支と CO_2 ガス

密集根群を介した局所的な下方浸透および根の吸水量は，水収支を用いて定量的に推定できる．Tokumoto et al.（2018）は，蒸散に対する各土層の吸水量を次式で求めた.

$$\sum_t^{t+\Delta t} D = \sum_t^{t+\Delta t} I - \sum_t^{t+\Delta t} T - \sum_i^n \Delta S_d \qquad (4)$$

ここで，D は排水量（mm），I は灌水量（mm），T は蒸散量（mm），ΔS_d は土壌厚さ d における貯水量の変化量（mm），t は時間，i は土層の数，n は対象とする土層の最大数である．本研究において，土槽下端から排水は生じず，地表から深さ 75 mm 表層とそれ以深の下層における 2 層（$n = 2$）の ΔS_d を検討する場合，（4）式を以下のように表すことができる（徳本 · 藤巻, 2021）.

$$\sum_t^{t+\Delta t} \Delta S_{db} = \sum_t^{t+\Delta t} I - \sum_t^{t+\Delta t} T - \sum_i^n \Delta S_{du} \qquad (5)$$

ここで，ΔS_{du} および ΔS_{db} は深さ 75 mm 以浅と以深の表層（upper）· 下層（bottom）の ΔS_d をそれぞれ表す．Δt 時間内における ΔS_{du} は TDR で計測した θ_{75mm} と土層厚さ 75 mm の積で求められる.

（5）式を用いて，栽培実験開始 20 日目から 27 日目までの灌水量，日蒸散量の積算値の経時変化を Fig. 9a に示す．この期間における日蒸散量の積算値は，供試作物の生育に伴って，灌水量の積算値を 5 mm 程度より高く維持しながら推移した.

Fig. 9b は，表層と下層における 2 層の $\sum\Delta S_d$ の積み上げ図の経時変化である．$\sum\Delta S_{db}$ は常に $\sum\Delta S_{du}$ を上回り，それらの総和が減少する過程では，下層に分布する根の吸水が蒸散に寄与したことを意味する．これは，灌水時に人工マクロポアを介した局所的な水分下方浸透が生じ，下層に土壌水分がより多く貯留されるためである．したがって，$\sum\Delta S_{du}$ と $\sum\Delta S_{db}$ の和は灌水後に正の値を取り，その後の蒸散の進行に伴い，負の値となった．徳

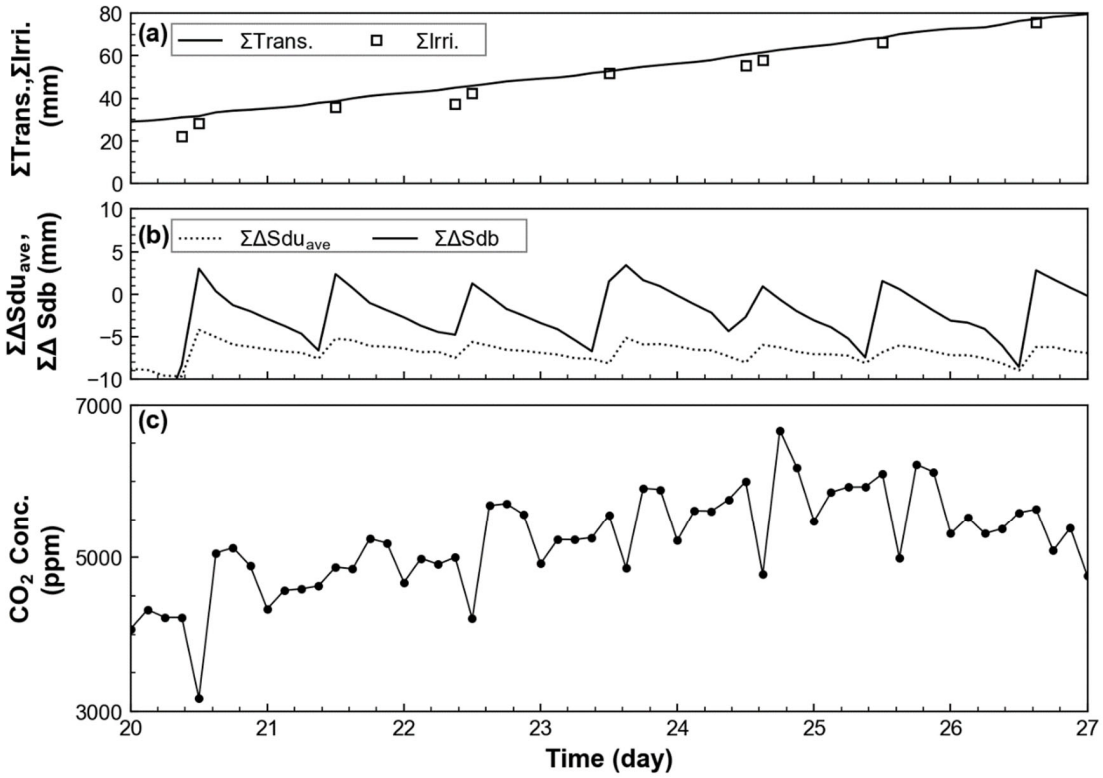


Fig. 9　栽培実験開始 20 日目から 27 日目までの（a）灌水量，日蒸散量の積算値の経時変化，（b）土槽の表層と下層における 2 層の $\sum\Delta S_d$ の積み上げ図の経時変化，（c）人工マクロポア内の CO_2 ガス濃度の経時変化.
Temporal changes from day 20 to day 27 of the cultivate experiment in (a) cumulative irrigation and cumulative daily transpiration, (b) the stack plot of $\sum\Delta S_d$ of the surface and bottom layers of soil column, (c) CO_2 gas concentration within the artificial macropore.

本 · 藤巻（2021）は水収支に加えて，人工マクロポアの下端の圧力変化から灌水時の局所的な下方浸透を明らかにしているため，表層と下層では不均一な θ 分布が生じたと推察された.

同期間における人工マクロポア内の CO_2 ガス濃度の経時変化では，灌水時に CO_2 ガス濃度が一時的に減少した後，上昇する傾向がみられた（Fig. 9c）. 24 日目の灌水で CO_2 ガス濃度が最も大きく上昇し，その上昇量は 1890.57 ppm に達した．灌水中における CO_2 ガス濃度の一時的な低下について，下方浸透に伴う大気の流入に影響されるか，より詳細な検討が必要である．しかし，灌水後の CO_2 ガス濃度の上昇は，下層土中の θ 増加により，土壌微生物活性が高まり（遠藤ら, 2010; 加藤ら, 2013），人工マクロポア下方での CO_2 ガス発生増加が主な要因と考えられた.

4. おわりに

本研究では，人工マクロポアを介した CO_2 ガス動態を検討するため，人工マクロポア内の土壌ガス濃度を計測するシステム構築および評価を行った．本システムで利用した CO_2 センサー（GMP252）の水蒸気濃度依存性および気密性試験により，水蒸気を含む CO_2 ガス濃度 7000 ppm までの計測が可能であった．しかし，対象とする人工マクロポアの大きさや循環経路のガス体積に応じて，小流量ポンプの循環ガスの流量や稼動時間の適切な設定が必要であると考えられた.

局所耕うん法の模擬土槽栽培実験では，作物栽培条件下における人工マクロポア内の CO_2 および O_2 ガス濃度計測を行った．CO_2 および O_2 濃度は相補的に変動する傾向が認められ，根巻き土壌を介した人工マクロポアと大気間のガス交換の影響が確認された．とくに，水収支に基づく，点滴灌漑後の局所的な下方水分浸透は，人工マクロポア下方の水分量を増加させるため，微生物活性による CO_2 発生量の増加に寄与することが示唆された.

謝辞

本研究は，科学研究費補助金（基盤研究（若手）20K15623, 基盤研究（C）26511009）によって行われました. また，東京農業大学の田島淳 教授 · 實野雅太 助教には，局所耕うん法の栽培に関して多大なるご協力を頂いた．ここに記して謝意を表します.

引用文献

Batjes, N.H. (1996): The total carbon and nitrogen in the soils of the world. Eur. J. Soil Sci., 47(2): 151–163.

遠藤敏史, 常田岳志, 井本博美, 西村 拓, 宮﨑 毅 (2010): 埋設型ガスモニタリングシステムを用いた降雨時の不飽和黒ボク土壌中 CO_2 ガス濃度変化の検討. 農業農村工学会論文集, 269: 25–31.

Guo, L., Nishimura, T., Imoto, H. and Sun, Z. (2018): Macropores regulate CO_2 behavior in an andisol soil. Paddy and Water Environment, 16: 391–396.

濱本昌一郎 (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. 土壌の物理性, 151: 61–67.

Heard, J.R., Kladivko, E.J. and Mannering, J.V. (1988): Soil macroporosity, hydraulic conductivity and air permiability of silty soils under long-term conservation tillage in Indiana. Soil & Tillage Research, 11: 1–18.

広瀬春朗, 熊田恭一 (1967): 畑状態下におけるアンモニア態窒素の有機化過程と再無機化過程（その 2） 水田土壌の窒素経済に関する研究（第 4 報）. 日本土壌肥料学雑誌, 38(6): 193–197.

Hodges, C., Kim, H., Brantley, S.L. and Kaye, J. (2019): Soil CO_2 and O_2 concentrations illuminate the relative importance of weathering and respiration to seasonal soil gas fluctuations. Soil Sci. Soc. Am. J., 83: 1167–1180.

IPCC (2019): 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Ap4_Biochar.pdf. （2024 年 4 月 1 日確認）

加藤千尋, 井本博美, 西村 拓, 宮﨑 毅 (2013): 小型チューブ埋設型土壌ガスモニタリングシステムを用いた農地土壌中 CO_2 ガス濃度変動の検討. 土壌の物理性, 124: 25–33.

久保田 幸, 亀山幸司, 北川 厳, 岩田幸良 (2024): 市販鶏ふん炭の炭素貯留量推定係数の適用性と肥料資材としての施用効果の検討. 農業農村工学会論文集, 318(92–1): II_1–II_8.

Lopez, N.V., Tajima, K., Tanaka, H., Thanh, T., Yukumoto, W., Jitsuno, M., Kato, M., Sakaguchi, E., Tatuno, J. and Ishii, T. (2013): Guidance of a transplanting skid steer vehicle with variable center of gravity. IJFRD, 4–1: 75–80.

松森一浩, 三枝正彦, 伊藤豊彰 (2004): ダイズの穴播き式不耕起播種機の開発（第一報）— 穴播き式不耕起播種機の原理と構造 —. 農業機械学会誌, 66(1): 90–97.

Mori, Y., Fujihara, A. and Yamagishi, K. (2014): Installing artificial macropores in degraded soils to enhance vertical infiltration and increase soil carbon content. Progress in Earth and Planetary Science, 1: 30.

日本塑性加工学会編 (1988): プラスチック成形加工データブック, p. 20. 日刊工業新聞社, 東京.

岡香奈子, Bui, T.L., 森也寸志, 大澤和敏, 干川 明 (2022): 不耕起栽培と人工マクロポア導入が石垣島サトウキビ畑における土壌保水と有機物蓄積へ与える効果. 土壌の物理性, 150: 93–103.

遅沢省子, 久保田徹, 宮﨑 毅, 中野政詩 (1989): 土の中の物質移動（その 8）— 土の中のガスの成分変化と移動 —. 農業土木学会誌, 57(2): 135–142.

遅澤省子 (1998): 土壌中のガスの拡散測定法とその土壌診断やガス動態解析への応用. 農業環境技術研究所報告, 15: 1–66.

Reum, F., Gerbig, C., Lavric, J.V., Rella, C.W. and Göckede, M. (2018): Correcting atmospheric CO_2 and CH_4 mole fractions obtained with Picarro analyzer for sensitivity of cavity pressure to water vapor. Atmos. Meas. Tech. Discuss., doi:10.5194/amt-2018-242.

Roth, C.H., Meyer, B., Frede, H.G., Derpsch, R. (1988): Effect of mulch rates and tillage systems on infiltrability and other soil physical properties of an Oxisol in Paraná, Brazil. Soil and Tillage Research, 11: 81–91.

田島 淳, 加藤雅義, 樹野淳也, 玉木浩二 (2003): 雑草リビングマルチを利用した局所耕うん栽培における元肥の施用方法とチンゲンサイの生育. 農作業研究, 38(1): 17–24.

徳本家康, 藤巻晴行 (2021): 局所耕うん法の密集根群における吸水と下方浸透. 日本砂丘学会誌, 67(2): 69–77.

Tokumoto, I., Heilman, J.L., Litvak, M.E., McInnes, K.J., Schwinning, S., Morgan, C.L.S. and Kamps, R.H. (2018): Soil water storage and root water uptake by invasive species in a karst savanna, Texas, Sand Dune Research, 64: 89–99.

Unger, P.W. and McCalla, T.M. (1980): Conservation tillage system, Adv. Agro., 33: 1–53.

Vaisala (2018): GMP252 user guide in Japanese, https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/GMP252-User-Guide-in-Japanese-M211897JA_0.pdf. （2024 年 4 月 7 日確認）

Weil, R.R. and Brady, N.C. (2017): The nature and properties of soils 15th edition, p. 546. Pearson, England.

This article is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY-NC-ND) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

要　　旨

本研究では，栽培条件下における人工マクロポア内の土壌 CO_2 ガス濃度の変動を評価するため，非分散型赤外線式 CO_2 センサーなどを用いた土壌ガス計測システムを構築した．また，水蒸気濃度に対するセンサーの応答，システムの気密性，標準ガスを用いたマクロポア内の CO_2 ガス濃度の計測値を検討することで，本システムの有効性を評価した．本システムは，400 ～ 7000 ppm の CO_2 濃度範囲と 0 ～ 25 mmol mol^{-1} の水蒸気濃度範囲において，人工マクロポア内の土壌ガス濃度のモニタリングに有効であることが示された．さらに，幼苗の下に人工マクロポアを作成した黒ボク土槽を用いて，点滴灌漑下における土壌ガス濃度計測を実施した．水収支法により求めた，点滴灌漑時の局所的な下方水分浸透および人工マクロポア底面の水分量の増加は，CO_2 ガス発生に影響することを示唆した．

キーワード：土壌 CO_2 ガス , 非分散型赤外線式 CO_2 センサー，水蒸気濃度依存性，選択流