J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 124, p.25 ～ 33 (2013)

JpGU 特集
論　文
Original Paper

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

加藤千尋[1]・井本博美[1]・西村　拓[1]・宮﨑　毅[2]

Investigation of changes in soil CO_2 concentration by using compact buried tubing soil gas monitoring system

Chihiro KATO[1], Hiromi IMOTO[1], Taku NISHIMURA[1] and Tsuyoshi MIYAZAKI[2]

Abstract: Authors developed compact soil gas monitoring system which consisted of gas-permeable silicone rubber, a non-dispersive infrared CO_2 gas sensor and galvanic cell O_2 sensor for the purpose of evaluating changes in soil CO_2 concentration in fields. In this study, 0.5-mm-thick silicone rubber sheet was used for CO_2 sensing tube, which was reinforced with plastic and stainless mesh pipes. Time required to reach 95 % equilibrium of CO_2 concentration of 0.5-mm-thick silicone rubber tube was 104 minutes, while that of 4-mm-thick tube, which reported previously, was 1175 minutes. The constructed system was buried in agricultural bare field and continuous monitoring of soil CO_2 concentration was conducted through a year. Since an amplitude of seasonal changes in soil temperature in agricultural field is relatively large, e.g., >25 °C at depth of 10 cm in this study field, temperature dependence of NDIR CO_2 sensors was investigated. After temperature correction and calibration, monitored results agreed with the soil CO_2 concentration which was measured by conventional gas sampling method. Monitored data showed seasonal and daily changes in soil CO_2 concentration accompanied with changes in soil temperature. Quick response to increase in soil CO_2 concentration following each rainfall event was also observed. Simultaneous decrease in O_2 concentration suggested that microbial activity could be dominant factor of increase in soil CO_2 concentration caused by rainfall.
Key Words : CO_2, soil respiration, gas permeable tube, field monitoring, non-dispersive infrared CO_2 sensor

1. はじめに

土壌は，大気中の総炭素量の約 2 倍，植物バイオマスの約 3 倍の炭素量を有し（Sundquist, 1993），土壌炭素の損失は，地球規模の炭素循環，生態系の生産性に重要な影響を及ぼす（和穎 ·Sollins, 2002）．そのため，土壌から大気への二酸化炭素（CO_2）放出量や土壌中の有機物炭素量の長期変動については，従来からガスフラックスの測定や炭素動態モデル（例えば Li et al., 1992; Coleman and Jenkinson, 1996 など）を用いた数値計算を通して数多く検討されてきた．

近年，農地土壌における炭素貯留能（Carbon Capture and Storage; CCS）が注目されており，例えば有機物の連続施用によって農地土壌中の炭素ストック量を増加させる試みが検討，試行されている（農林水産省, 2008）．また，耕起方法や施肥方法などの圃場管理法によって農地土壌からの CO_2 放出量を減らす温暖化緩和策の検討も行われている（例えば，Lal and Kimble, 1997; Alvaro-Fuentes et al., 2012）．有機物施用量や施用深さ，耕起深さなどの具体的な緩和策を検討するためには地表面から放出される CO_2 のフラックスのみでなく，各深さにおける CO_2 濃度をも把握し，土中で生じる有機物の無機化について検討する必要がある．

土壌中の各種ガス濃度測定には，これまで主にガス採取管を所定の深さに挿入して直接土壌中のガスを採取し，対象とするガスの濃度を定量する方法が用いられてきた（柳井・常田, 2009; Rolston, 2002; 井本ら, 2003）．この方法は，ガスを採取する際に土壌中の空気を吸引するため，土壌空気が減圧され，ガスの移流が生じる可能性がある．そのため，頻繁なサンプリングには不向きである．

これに対し近年，土壌中にガス透過性を有する樹脂を埋設し，土壌中のガス圧力環境を乱さずに各種ガス濃度の測定を行う手法が試みられている（柳井・常田, 2009; Kammann et al., 2001; 遠藤ら, 2010）．ガス透過性樹脂には，シリコーンゴムやポリテトラフルオロエチレン，フッ化エチレンプロピレンなどがあり，これらの素材はガスを通すが水は通さない．たとえば，チューブ状のガス透過性樹脂の両端を閉じて土壌中に埋設すると，樹脂を介してガスの拡散が始まり，チューブ内外のガスは平

[1]Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657, Japan. Corresponding author: 加藤千尋，東京大学大学院農学生命科学研究科
[2]Professor Emeritus at The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, JAPAN.
2012 年 10 月 31 日受稿　2013 年 2 月 23 日受理

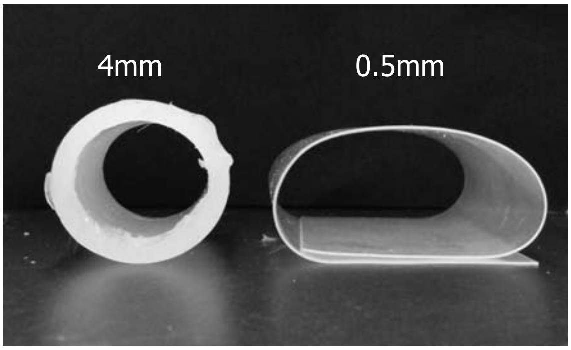

Fig. 1 肉厚 4 mm 及び 0.5 mm のシリコーン樹脂の比較.
4 mm and 0.5 mm thick silicone rubbers.

衡に達する．平衡時にチューブ内のガス濃度を測定すれば，土壌空気の圧力環境を乱さないまま土壌中のガス濃度を把握することができる．

近年，特に CO_2 濃度測定について，高精度で比較的安価なセンサが利用可能になり，連続測定が行われるようになった．Hirano et al.（2003）は，厚さ 3 mm のポリ塩化ビニル（PVC）チューブに非分散型赤外線（Non-dispersive infrared: NDIR）式 CO_2 濃度変換器（GMD-20，Vaisala）のセンサ部を取り付け，森林土壌の上層 20 cm 程度までの 3 深度に埋設し，半年間の土壌中 CO_2 濃度の測定を行った．このとき，PVC チューブの側面にはスリットを設け，そのスリットが下向きになるようにチューブを土壌に埋設することによって，CO_2 濃度変換器のセンサ部を雨水から防護しつつ，土壌空気中の濃度変化に対するセンサの早い応答を促した．しかし，スリットを設けた場合，水分飽和時にセンサ部への浸水を防げない．

そこで，ガス透過性樹脂と NDIR 式センサを組み合わせた測定も試みられてきた．たとえば遠藤ら（2010）は，ガス透過性チューブの内部に NDIR 式 CO_2 濃度変換器を封入した，チューブ埋設型ガスモニタリングシステム（Buried Tubing Gas Monitoring System; BT-GMS）を作成し，農地土壌中の CO_2 連続測定を行った．その際，チューブの素材および肉厚の違いに応じたガス透過性能の評価を行い，素材としてはシリコーンゴムが適しており，さらにその肉厚が薄いほど，ガス透過性が向上することを確認した．ただし，土壌中においては土被り圧があるため，ガス透過性チューブはある程度の強度が必要である．軟質のシリコーンゴムを用いる場合は，肉厚が薄すぎると土被り圧に耐えられずつぶれてしまうため肉厚を薄くするには限界があり，遠藤ら（2010）は肉厚 4 mm，長さ 1 m のシリコーンチューブを選択した．この場合，土壌中 CO_2 濃度の，地温の季節変動にともなう変動のような長周期の現象を捉えることができた．また，CO_2 濃度変化の降雨に対する応答のように比較的速い現象についても，定性的に変化の有無を検出することは可能であった．ただし，肉厚 4 mm のシリコーンチューブは，外部の CO_2 濃度に対して 95 % 平衡に達するまでに半日程度を要したため，短時間で生じる現象の定量的な観測には課題が残った．また，システム全体が比較的大型であり（外径 28 mm，長さ 1 m），複数の深度に埋設する場合，チューブ同士が土壌中で近接し，周辺の土壌中の水，ガス，熱などの移動が撹乱されることが懸念される．

土壌中 CO_2 濃度の鉛直分布の形成要因として，土壌呼吸による CO_2 生成と，拡散を主とする CO_2 移動に大別できる．裸地土壌の場合，CO_2 生成速度は土壌微生物の呼吸速度と等しく，CO_2 濃度とともに O_2 濃度を測定することによって，CO_2 濃度変動の要因を把握し，土壌中の CO_2 ガス挙動について詳細な検討が可能になる．藤川（2003）は，宮崎県都城市の水田転換畑において，ガス採取管を用いて季節ごと（5，10，3 月）に土壌中の CO_2 濃度と O_2 濃度の鉛直分布を測定した．その結果，どの時期も高乾燥密度の耕盤層において急激に CO_2 濃度が上昇，O_2 濃度が低下し，その傾向は特に 10 月に顕著であった．その要因は，10 月は他の時期と比べて耕盤層の地温や水分量が高く，微生物活性の上昇や，ガス拡散移動速度の低下が生じたためであると考察した．各降雨イベントや連続的な地温変化に対する土壌中 CO_2，O_2 濃度の応答について，遠藤ら（2010）は，上述のシリコーンチューブ内に，NDIR 式 CO_2 濃度変換器と同時にガルバニ電池式 O_2 ガスセンサも封入した．しかし，肉厚 4 mm のシリコーンチューブの，O_2 濃度の 95 % 平衡時間は 2100 分と CO_2 の場合と比べてさらに大きく，圃場における土壌中 O_2 濃度に関する考察は行わなかった．このように観測機器やシステムの不足のため，農地土壌中の CO_2 濃度と O_2 濃度を，年間を通して同時に連続測定した例はほとんどない．

また，フィールドにおいては計測環境の制御が難しいため，センサ，機器類を用いて実験や観測をする際には，センサ，機器の環境依存性を把握し，出力値の補正をする必要がある．NDIR 式 CO_2 濃度変換器は元来，モル濃度（CO_2 分子数）を測定するため，求める精度によっては気体の状態方程式に基づき，気圧や気温の変動を考慮することが推奨されている．これに加え，赤外線の波長は温度に応じてシフトするため，NDIR 式 CO_2 濃度変換器自体も温度依存性を持つと考えられる．樹木やリターの被覆がない農地土壌においては，地温の変動は森林土壌と比べて大きく，出力値の温度補正の重要性は高い．

以上を踏まえ本研究では，システムの小型化及びガス濃度変化に対する応答性向上と耐荷重性の両立を念頭に，小型チューブ埋設型土壌ガスモニタリングシステムを開発した．フィールドにおける土壌中 CO_2 濃度連続モニタリングに適用するために，システムに用いた NDIR 式 CO_2 濃度変換器の温度依存性の検討も行った．また，システムには O_2 センサも搭載し，裸地農地土壌中 3 深度における土壌中 CO_2 濃度の連続モニタリングに適用，地温の季節変動や降雨に対する土壌中 CO_2 濃度変動を検討した．

2. 材料と方法

2.1 埋設型ガスモニタリングシステムの小型化

本研究ではガス透過性樹脂として，肉厚 0.5 mm，縦

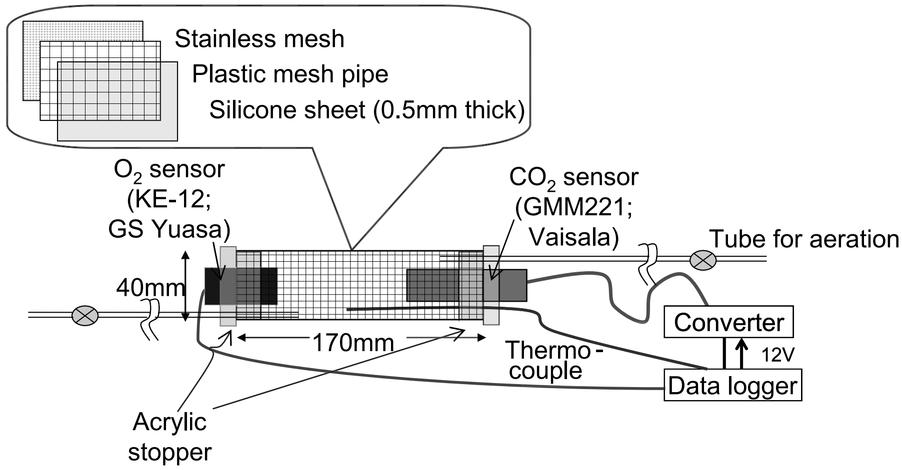

Fig. 2　C-BT-GMS の概要.
Outline of C-BT-GMS.

20 cm，横 20 cm のシリコーンシートを用いた．遠藤ら（2010）が用いたものと同じ肉厚 4 mm のシリコーンチューブと本研究で用いたシートの断面の比較を Fig. 1 に示す．肉厚 0.5 mm のシートは，チューブ状になるように丸めると強度不足のため断面が円形を保てず楕円状につぶれる．そこで本研究では，土中埋設時の土被り圧に耐えるため，プラスチックメッシュパイプ（ゴルフクラブプロテクター ネトロン®，メッシュサイズ 2.5 mm，内径 30 mm）にシリコーンシートを巻いて継ぎ目を接着剤（スーパー X，セメダイン）で密封するとともに，円筒状に丸めたステンレス製の網（メッシュサイズ 0.5 mm）をプラスチックメッシュパイプ内に挿入して補強した．このとき，プラスチックメッシュパイプの両端は，アクリル製の栓を作成して閉じた．この栓は，直径 34 mm，長さ 15 mm のアクリル棒を，一端から長さ 10 mm までの部分を直径 29.8 mm（プラスチックメッシュパイプ内径よりやや細い）になるように削って凸形にして作成し，プラスチックメッシュパイプに接着した．また，このアクリル製の栓とプラスチックメッシュパイプに巻いたシリコーンシートを接着剤（スーパー X）で接着した．さらに，シリコーンシートの上からステンレスの針金を巻きつけて固定した．以下，ステンレス製の網を丸めて作った円筒，プラスチックメッシュパイプ及びシリコーンシートを合わせて，「シリコーンチューブ」と呼ぶ．アクリル製の栓には穴を開け，シリコーンチューブの一端に NDIR 式 CO_2 濃度変換器（GMM221，濃度範囲 0 ～ 5%，Vaisala），他端にガルバニ電池式 O_2 センサ（KE-12，GS ユアサ）及び銅–コンスタンタン型熱電対のセンサ部を封入した．GMM221 は印加電圧 11 ～18 V で動作するため，データロガー（CR1000，Campbell）を用いて，測定前の 30 秒間の暖気運転時及び測定時に 12 V を供給した．測定時には，CO_2 濃度，シリコーンチューブ内温度，O_2 濃度のデータを記録した．以下，シリコーンチューブと GMM221 のセンサ部，熱電対及び O_2 センサを合わせて「小型チューブ埋設型ガスモニタリングシステム（Compact Buried Tubing Gas Monitoring System; C-BT-GMS，Fig. 2）」と呼ぶ．なお，本研究においては，土壌中の「ガス濃度」を，土壌中気相体積あたりの，対象とするガス体積の割合 [$m^3\ m^{-3}$] とし，体積百分率 [%] で表すこととする．

シリコーンチューブ両端の栓にはさらに，ステンレスパイプ（外径 2 mm）を取り付け，これに地上につながるナイロン製の通気用チューブを取り付けた．ナイロンチューブは，耐候性，耐屈曲疲労性に優れ，土壌中でも劣化しにくい利点がある．また，ナイロンの CO_2 ガス透過性は，シリコーンゴムの透過性のおよそ 10^{-5} 倍と低い（日本塑性加工学会, 1988）．この通気用チューブの先端には三方コックを取り付け，通常はコックを閉じた状態にした．後述するフィールドモニタリングにおいては，約半年に一度，コックを開放し通気用チューブの先端から窒素ガスを注入することによってシリコーンチューブ内の空気を追い出す「フラッシュ」作業を行った．フラッシュの後，三方コックを閉じ，再びシリコーンチューブ内の空気と土壌空気を平衡させ，CO_2 濃度測定を続けた．そしてフラッシュ後は，後述のように出力値と CO_2 濃度のキャリブレーション式の修正を行った．

なお，シリコーンチューブやフラッシュ用ステンレスパイプ，センサ類とアクリル製の栓の接合部には，シーリング剤（バスコーク，セメダイン）を塗り，シリコーンシートを介したガス拡散以外は，シリコーンチューブ内外のガス移動がないよう留意した．

2.2 C-BT-GMS の応答性の確認

ガス透過性の評価指標の一つに，95 % 平衡時間（遠藤ら, 2010）がある．これは，チューブ内外のガス濃度に差があるときに，その濃度差が初期の 5 % になるまでの時間と定義する．この指標を用いて，本研究で作成した肉厚 0.5 mm のシリコーンチューブを使用した C-BT-GMS 及び，遠藤ら（2010）と同じ肉厚 4 mm，長さ 1 m のシリコーンチューブを有する BT-GMS の応答性を比較した．前者については大気中と水中，後者については大気中のみにおいて，95 % 平衡時間を測定した．

25 °C 一定の恒温室において，スタンドに C-BT-GMS

のシリコーンチューブを取り付け，大気中または水を張った水槽中に静置した．そして，C-BT-GMS の通気用チューブの一端から，約 5 % の CO_2 ガスをシリコーンチューブ容積の約 1.5 倍送り込み，通気用チューブのコックを閉じた． その時点を開始時刻としてそのまま放置し，CO_2 濃度の変化を記録した．また，遠藤ら（2010）と同型の肉厚 4 mm，長さ 1 m のシリコーンチューブを有す BT-GMS を用いた同様の試験においては，チューブ内空気の一部を 99.9 % の CO_2 標準ガスで置換し，チューブ内を外部と比べて高濃度にした状態を初期条件とした．なお，水中の試験には 1 日汲み置いた水道水を用い，試験中は常にモーターでプロペラを回して攪拌した．また，C-BT-GMS については，大気中，水中の試験とも同一の個体を用いた．

2.3 C-BT-GMS の温度依存性補正

2 セットの C-BT-GMS を恒温チャンバー（エスペック）の中に静置し，温度を数段階変化させたときの出力の変化から，NDIR 式 CO_2 濃度変換器の温度依存性を確認した．恒温チャンバーは，ファンによってチャンバー内の空気を攪拌し，チャンバー内の空気の温度が均一になるように設計されている．本研究では恒温チャンバー内の温度を半日以上一定にし，その間にセンサの出力値が安定することを確認した．GMM221 の変換器部分やデータロガー，バッテリー類はすべて，外部温度の影響を受けないように断熱材を巻き，恒温チャンバーの外に置いた．

2.4 C-BT-GMS の野外観測への適用

東京大学大学院農学生命科学研究科附属生態調和農学機構内の 3S 圃場（東京都西東京市; 35° 44’ 13” N，139° 32’ 30” E）において，2010 年 8 月 28 日から 2011 年 10 月 31 日まで，C-BT-GMS を用いて深さ 10，20，50 cm の CO_2 濃度の連続モニタリングを行った．同時に，同じ深さの土壌水分と地温も測定した．圃場は，本モニタリング開始の約 2 年前（2008 年 8 月）に，10 m 四方を深さ 10 cm 程度までロータリープラウをかけて掘り起こし，一様な「裸地」とした．その後，適宜除草剤（ラウンドアップマックスロード， 日産化学工業）を散布，あるいは根こそぎ手で抜くことによって雑草を除去し，モニタリング終了時まで裸地を維持した．その際，C-BT-GMS を埋設した周囲 2 m 程度には，除草剤がかからないように留意した．圃場の土壌は，地表面から深さ 35 cm が黒ボク土（土性 Loam），35 cm より下は立川ローム土（土性 Light Clay）であった（Kato et al., 2011）．また，黒ボク土，立川ローム土の平均湿潤密度はそれぞれ 1.20, 1.05 [Mg m^{-3}] であった．したがって，50 cm 深さにおける C-BT-GMS が受ける土被り圧は，

$$1.20 \times (9.8 \times 10^3)\ [\mathrm{Nm^{-3}}] \times 0.35\ [\mathrm{m}] + 1.05 \times (9.8 \times 10^3)\ [\mathrm{Nm^{-3}}] \times 0.15\ [\mathrm{m}] = 5.66\ [\mathrm{kNm^{-2}}]$$

である．

地温は，C-BT-GMS のシリコーンチューブ内に封入した熱電対とは別に，土壌中に銅–コンスタンタン型の熱電対を埋設して測定した．また，土壌水分量の測定には TDR100（Campbell）に接続した TDR（Time Domain Reflectometry）センサ（自作）を用いた．これらの熱電対及び TDR100 はデータロガー（CR10X, Campbell）に接続し，20 分ごとにデータを記録した．なお，TDR センサの出力値（比誘電率）は，Maxwell - De Loor - Dobson モデル（Dobson et al., 1985; Dirksen and Dasberg, 1993）を用いて体積含水率に換算した．換算に必要な，各土壌の比表面積などの物性値は，Kato et al.（2011）を参照した．

C-BT-GMS を土壌中に埋設する際は，圃場に深さ 70 cm の断面を出し，深さ 10 – 15，20 – 25，50 – 55 cm の位置に，地表面に水平に，長さ 20 cm，奥行き 5 cm 程度の溝を作り，その溝にシリコーンチューブをはめ込んだ後，土を埋め戻した．C-BT-GMS の CO_2 濃度変換器及び熱電対は，先述のようにデータロガー（CR1000, Campbell）に接続し，20 分ごとにデータを記録した．データ記録後，シリコーンチューブ内外で測定した地温を比較し，同じ深さではほぼ等しいことを確認した（データ非掲載）．また，先述のように半年に一度，シリコーンチューブ内に純 N_2 ガスを送り込み，シリコーンチューブ内に存在している空気を送り出す「フラッシュ」作業を行った．

C-BT-GMS の検証のため，別途ガス採取管（井本ら, 2003）を挿入後，約半年間設置し，C-BT-GMS と同じ 3 点の深さから適宜ガスを採取した．採取したサンプルは真空バイアルに移して実験室に持ち帰り，ガスクロマトグラフ（GC-2014, SHIMADZU）を用いて定量した．

なお，フィールドモニタリングに用いた 3 セットの C-BT-GMS と，温度依存性試験に用いた 2 セットの C-BT-GMS は全て別個体である．

2.5 C-BT-GMS のキャリブレーション

本研究で使用した CO_2 濃度変換器 GMM シリーズは，CO_2 濃度と出力（電圧）値の間に線形関係があることが報告されている．そこで，圃場に埋設した 3 セットの C-BT-GMS 内の GMM221 について，以下の方法でキャリブレーションを行った．

C-BT-GMS を埋設した後，地上に出した通気用ナイロンチューブの一方から，シリコーンチューブの容積の 1.5 倍程度の CO_2 標準ガス（CO_2 = 0.970 % と 2.91 %），純 N_2 ガス（CO_2 = 0.0 %）を注入し，シリコーンチューブ内をこれらのガスで満たした．このとき，初めにシリコーンチューブ内に存在していたガスは，もう一方の通気用チューブのコックを開け，地上に追い出した．

シリコーンチューブ内に標準ガスを満たしたあと，センサ出力値を読み取り，標準ガスの濃度と対応させてグラフにプロットした．なお，2 種類の濃度の CO_2 標準ガスを注入したのが 2010 年 9 月 9 日（地温約 25 ～ 26 °C），N_2 ガスを注入したのが 2011 年 1 月 6 日（地温約 3 ～ 8 °C）であったため，後者のデータに対しては先述の温度補正を行い 25 °C のときの出力値に換算してからキャリブレーション式を求めた．また，C-BT-GMS で使用したセンサ GMM221 と同じシリーズの NDIR 式 CO_2 濃度変換器（GMM222, 高濃度用）のセンサ部の 90 % 応

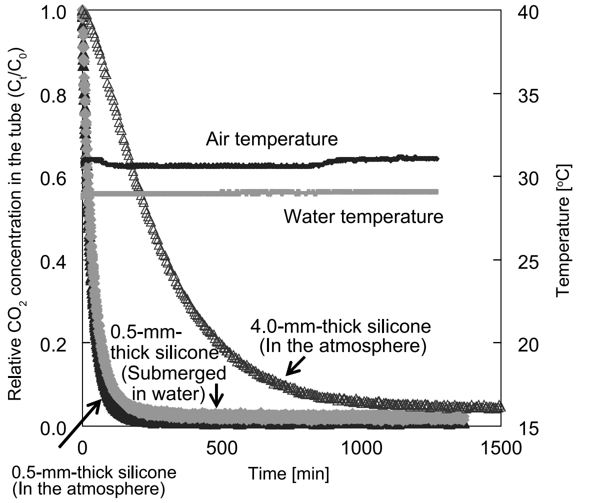

Fig. 3　大気中及び水中におけるシリコーンチューブ内の CO_2 濃度変化.
Changes in CO_2 concentration in the silicone tube in the atmosphere and submerged into water.

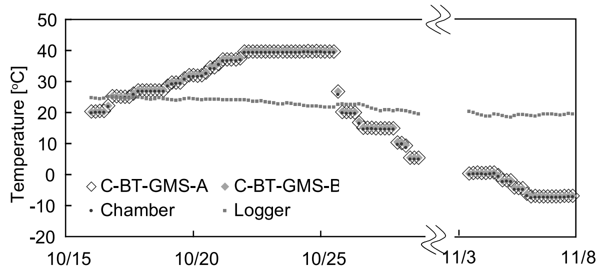

Fig. 4　恒温チャンバ内と C-BT-GMS シリコーンチューブ内及びロガー周辺の温度変化（各部温度は 4 時間平均値．10/30 から 11/3 は測定を中断し，恒温チャンバ及びデータロガーの電源を切っていたため，欠測である．）
Changes in 4-hour averaged temperature of inside of the constant temperature chamber, silicone tubes and around data logger. Values are missing from 30th Oct. to 3rd Nov.).

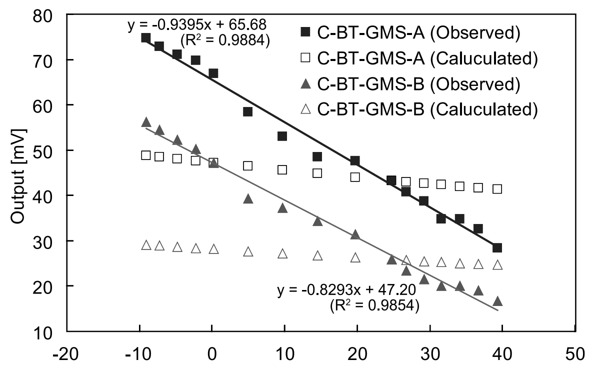

Fig. 5　温度と CO_2 濃度変換器の出力値の関係
（中抜きプロットは 25 ℃における出力値を基準とし，気体の状態方程式に基づいて温度補正をした場合の計算値）.
Relationship between temperature and output of CO_2 sensors (Open symbols mean corrected values based on gas state equation.)

答時間は，器差があるが 150～280 秒程度と報告されている（溝口・大谷，2005）．これを考慮し，標準ガスを複数回に分けて注入したあと，1 分間隔で 3 回以上出力値を読んだ．

3. 結果と考察

3.1 C-BT-GMS の応答性

Fig. 3 に，本研究で作成した C-BT-GMS のシリコーンチューブ（肉厚 0.5 mm）及び，遠藤ら（2010）と同型のシリコーンチューブ（肉厚 4 mm）内に CO_2 標準ガスを満たした後の，シリコーンチューブ内 CO_2 濃度（実験開始時の CO_2 濃度を基準とした相対濃度）の経時変化を示す．

水中，大気中どちらの場合も，試験開始後すぐに，シリコーンを介してガスの拡散移動が始まった．そして，シリコーンチューブ内の CO_2 濃度はある程度までは急激に減少し，その後，緩やかに平衡状態に近づいた．本試験で用いたシリコーンチューブの，大気中における 95 % 平衡時間は，シリコーンの肉厚が 4 mm の場合に 1175 分であったのに対し，肉厚 0.5 mm にすると 104 分とおよそ 11 分の 1 に短くなった．また，肉厚 0.5 mm の場合，水中における 95 % 平衡時間は 128 分であり，遠藤ら（2010）と同様，大気中と比べると水中では平衡時間が長くなった．

3.2 C-BT-GMS の温度依存性及びキャリブレーション結果

Fig. 4 に，温度依存性試験中の恒温チャンバー内と，二つの C-BT-GMS（A，B とする）のシリコーンチューブ内に封入した熱電対で測定した温度の変化，及びチャンバーの外に静置したロガー周辺の温度変化を示す．ここで，「ロガー周辺の温度」は，ロガーのパネル上に設置したサーミスタによって測定した温度であり，先述のように実験中はサーミスタ及びロガーは断熱材で包まれていた．二つの C-BT-GMS のシリコーンチューブ内，及びチャンバー内（シリコーンチューブの外）の温度はほぼ一致し，チャンバーの設定温度とほぼ等しかった．また，チャンバーの外においたロガー周辺の温度は，実験室の温度低下にともない実験期間を通して 25 °C から 20 °C に緩やかに下降したが，本試験への影響は小さいと考えられる．

Fig. 5 に，チャンバー内温度と，その温度条件下における，C-BT-GMS（A, B）に封入した GMM221 の出力値平均値の関係を示す．また，25 °C における出力値を基準とし，気体の状態方程式に基づいて式（1）のように温度変化を考慮した補正値も併せて示す（Fig. 5，中抜きのシンボル）．

$$X_{P'T'} = X_{PT}\frac{P'T}{PT'} = X_{PT}\frac{P'(273+25)}{P(273+t')} \tag{1}$$

ここで，X_{PT} [mV] は圧力 P [hPa]，温度 T [K] = 298 [K] = 25 [°C] のときの出力値であり，圧力が P' [hPa]，温度が T' [K]= t' [°C] に変化した場合の出力値を $X_{P'T'}$ [mV] とする．ただし，Fig. 5 では，圧力は変化しない（$P = P'$）と仮定した．

温度依存性試験中はチャンバーの扉を開けなかったた

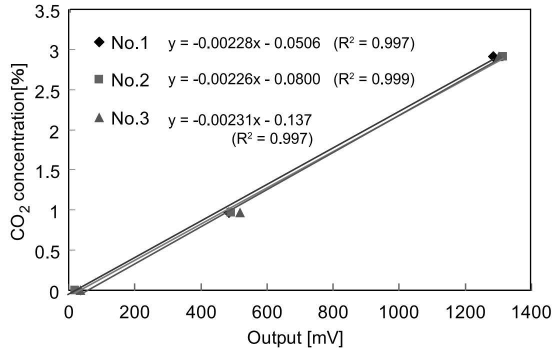

Fig. 6 25 ℃条件下の CO_2 濃度と CO_2 濃度変換器の出力値の関係.
Relationship between CO_2 concentration and output of NDIR CO_2 sensors under 25 ℃ condition.

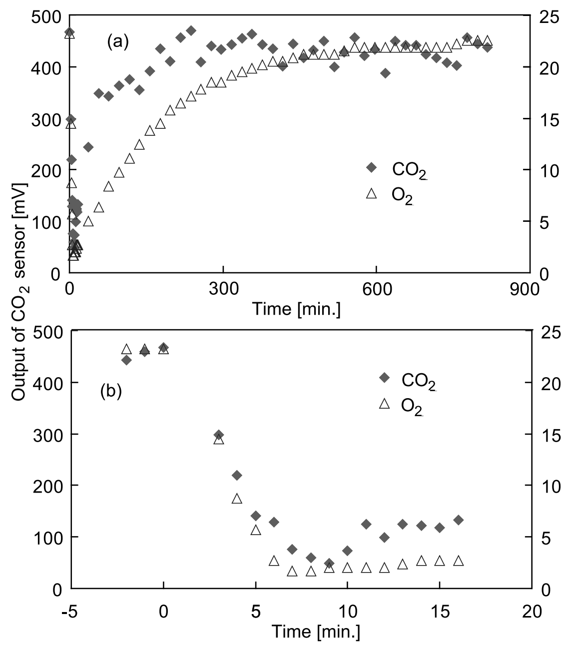

Fig. 7 「フラッシュ」後のシリコーンチューブ内の CO_2 及び O_2 濃度の経時変化.（N_2 ガス注入開始時を 0 分とする.（b）は N_2 ガス開始 2 分前から 20 分間程度を拡大した.）
Changes in outputs of CO_2 and O_2 sensors during and after substitution of air in the “silicone tube” with N_2 gas. (b) is the extension of the beginning of substitution. 0 [min.] is the time when injection of N_2 gas was started.

め，チャンバー内の CO_2 濃度は試験期間を通してほとんど変化がなかったと考えられる．それにも関わらず，チャンバー内温度の変化にともない，GMM221 の出力値は，気体の状態方程式に基づいて計算される変化と比べて大きな変化を示した．これは，NDIR 式 CO_2 濃度変換器の温度依存性と考えられる．本試験で設定した -10 °C から 40 °C の範囲では温度低下にともない CO_2 濃度変換器の出力値は増加する傾向が見られ，一次関数によって高い決定係数で近似できた．多項式や指数関数近似の場合，センサによって指数，係数が異なるため，常にセンサ個体ごとに温度補正式を定める必要がある．一次関数近似の場合もセンサによって切片が異なるが，圃場で対象としている温度範囲（約 -5 °C から約 40 °C）では傾きはほぼ等しかった．そこで本研究では，以下のように C-BT-GMS（A, B）内の GMM221 を用いて得られた二本の直線の傾きの平均（-0.8844）を傾きとする直線によって，C-BT-GMS 出力値の温度補正を試みた．

基準を 25 °C と定め，チューブ内の温度 t' °C と基準温度の差 $\Delta t = t' - 25$ [°C] を求める．25 °C よりも Δt °C 高温のとき，出力値は，$\Delta X = 0.8844 \times (\Delta t)$ [mV] 低くなる．そこで t' °C のときの出力値 $= X_{t'°C}$ [mV] から ΔX [mV] を引き，補正値 $X_{25°C} = X_{t'°C} - \Delta X$ [mV] を求めた．

まとめると，

$$X_{25°C} = X_{t'°C} - \Delta X = X_{t'°C} - 0.8844 \times (t' - 25) \qquad (2)$$

以下に示す C-BT-GMS によって測定した CO_2 濃度の値は，断りがない限りは温度補正を施した値である．

Fig. 6 に本研究で圃場に埋設した 3 セットの C-BT-GMS（No.1 ～ 3）の出力値– CO_2 濃度のキャリブレーション結果を示す．Fig. 5 のように，同じ型の変換器であっても，同じ濃度下で異なる出力値を示すため，出力値を CO_2 濃度に換算する際は，変換器の個体ごとにキャリブレーション式を決定した．

Fig. 7（a）（b）に，「フラッシュ」後の CO_2 濃度変換器及びガルバニ電池式 O_2 センサの出力値の経時変化を示す．ただし，フラッシュ作業では，シリコーンチューブ容積の 1.5 倍程度の純 N_2 ガスを送り込むのに約 3 分を要し，Fig. 7 では C-BT-GMS のシリコーンチューブに純窒素ガスを送り込み始めた時点を 0 分とした．また，Fig. 7（b）は，フラッシュ開始 2 分前から開始後 20 分までの各センサの出力値変化を拡大して示している．シリコーンチューブ内に N_2 ガスを送り込むと，シリコー

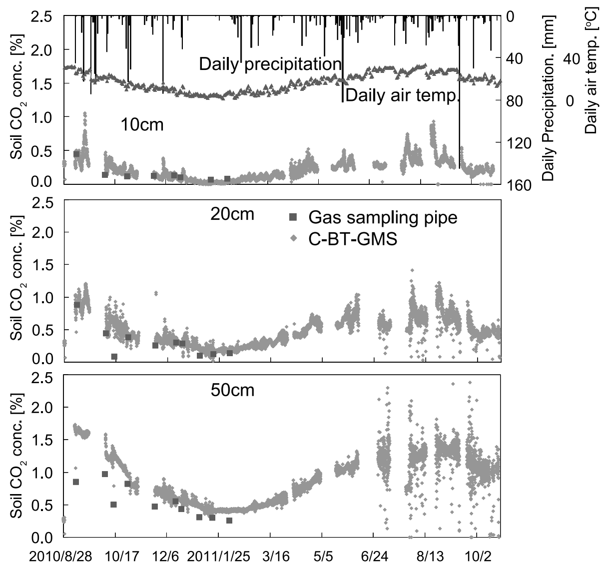

Fig. 8 C-BT-GMS とガス採取管を用いて測定した深さ 10, 20, 50 cm における土壌中 CO_2 濃度（2011 年 6 月から 10 月の深さ 20 cm 及び 50 cm における観測値の振れは，結線の緩みのためと考えられる）.
CO_2 concentration at depths of 10, 20 and 50cm observed with C-BT-GMSs and gas sampling pipes. Fluctuation of observed data at depths of 20 and 50 cm from Jun. to Oct. 2011 might be due to loose of wire connection.

Table 1　2010 年 10 月から 2011 年 3 月の，深さ 10, 20, 50 cm における月平均地温.
Monthly averaged soil temperature at depths of 10, 20, and 50 cm from Oct. 2010 to Mar. 2011.

	Oct. (2010)	Nov.	Dec.	Jan. (2011)	Feb.	Mar.
10 cm	18.4	11.4	7.2	3.0	5.2	7.7
20 cm	19.3	13.0	9.0	4.9	5.8	7.9
50 cm	20.3	15.3	11.6	8.0	7.4	8.6

Table 2　2010 年 10 月から 2011 年 3 月の，NDIR 式 CO_2 濃度変換器の温度補正有無による土壌中 CO_2 濃度測定結果の RMSE [CO_2%]（カッコ内は，RMSE の各深さの土壌中 CO_2 濃度（温度補正有）に対する割合 [%]）.
RMSE of CO_2 concentration between with and without temperature correction [CO_2%]. Values in bracket show the ratio [%] of RMSE to soil CO_2 concentration.

	Oct. (2010)	Nov.	Dec.	Jan. (2011)	Feb.	Mar.
10 cm	0.0206 (9.09)	0.0140 (10.3)	0.0121 (11.0)	0.0446 (158)	0.0401 (64.6)	0.0351 (36.3)
20 cm	0.0183 (3.39)	0.0279 (7.59)	0.0299 (7.27)	0.0410 (22.5)	0.0389 (18.1)	0.0346 (8.38)
50 cm	0.0121 (1.51)	0.0229 (4.04)	0.0232 (3.88)	0.0351 (8.01)	0.0396 (8.38)	0.0332 (6.21)

ンチューブ内の CO_2 及び O_2 センサの出力値は速やかに低下し，シリコーンチューブ内がほぼ N_2 ガスによって満たされたことを確認できた．フラッシュ作業後は，フラッシュ直後の変換器の出力値（電圧値）を CO_2 濃度 0 % における値とし，Fig. 6 で示した各線形関数の傾きは変更せず，キャリブレーション式の切片のみを修正した．

Fig. 8 に，2010 年 8 月 28 日から 2011 年 10 月 31 日までの，C-BT-GMS で測定した深さ 10，20，50 cm における土壌中 CO_2 濃度と日平均気温，日降水量（府中市 AMeDAS データ）を示す．また，ガス採取管を用いてサンプリングした土壌空気の定量結果（2010 年 9 月 9 日から 2011 年 2 月 4 日まで 10 回）も併せて示す．ただし，深さ 10 cm については，2010 年 10 月 15 日と 2011 年 1 月 6 日の二回は欠測である．同日同時刻における，深さ 10，20，50 cm の C-BT-GMS の測定結果とガス採取管を用いた CO_2 定量結果について二乗平均平方根誤差（RMSE）の平均値を算出すると，それぞれの深さで 0.0371，0.145，0.265 % となった．Vaisala 社によると，25 °C の条件下における GMM221 の測定精度は，「測定レンジの ±1.5 %+ 読み値の 2 %」とされ，本研究で用いた GMM221（CO_2 濃度の測定レンジ 0 ～ 5 %）では CO_2 濃度 0.075 % ～ 0.1 % 程度である．深さ 10 cm については，RMSE がこの範囲に含まれていた．他方，深さ 20，50 cm については，RMSE が 0.075 ～ 0.1 % を上回った．ただし，20 cm では 2010 年 10 月 15 日，同年 11 月 24 日，及び 2011 年 1 月 6 日の 3 回，50 cm では 2010 年 9 月 9 日，同年 10 月 15 日，2011 年 1 月 6 日の 3 回は，採取したガスの定量結果が C-BT-GMS の測定結果を大きく下回っており，これらの 3 回分を除くと，20 cm，50 cm 深における RMSE はそれぞれ 0.0570 %，0.107 % となった．ガスを採取する場合は，採取したガスを運ぶためのバイアル瓶の真空度不足などによって，ガスの定量結果が低く見積もられる問題が考えられる．さらにガスクロマトグラフによる測定精度を勘案すると，本研究の C-BT-GMS は従来法と同等あるいはそれ以上の精度で土壌中 CO_2 濃度の測定ができたと考えられる．

なお，土壌中は常に相対湿度がほぼ 99 % 以上で変動がなく，また本研究では C-BT-GMS 内の CO_2 濃度変換器のキャリブレーションを土壌中で行っているため，観測結果に対する水蒸気の影響は無視できると考えられる．

次に，CO_2 濃度の測定結果について季節変動に着目すると，どの深さにおいても低温の冬季に CO_2 濃度が低く高温の夏に高くなる傾向が観測された．このような季節変動は，遠藤ら（2010），Hirano et al.（2003）においても確認されており，微生物活性の温度依存性に起因すると考えられる．

Table 1 に，2010 年 10 月から 2011 年 3 月の，深さ 10，20，50 cm の 1 ヶ月ごとの平均地温，Table 2 に同じ 6 ヶ月に C-BT-GMS で測定した CO_2 濃度について，温度補正の有無の影響を RMSE として示す．併せて，RMSE の土壌中 CO_2 濃度（温度補正有）に対する割合 [%] も示す．本研究では温度補正は 25 °C を基準としており，秋から冬にかけて地温が低くなるほど温度補正の影響は大きくなる．特に深さ 10 cm においては，1 ～ 3 月に，温度補正の有無による RMSE が土壌中 CO_2 濃度の 0.363 ～1.58 倍と大きくなった．このように，NDIR 式 CO_2 濃度変換器の出力値は温度によって出力値が変化するため，年間を通して農地土壌中 CO_2 濃度の連続観測を行う際は，NDIR 式 CO_2 濃度変換器の出力値に対して温度補正をすることが必要であるといえる．

Fig. 9 に 2010 年 11 月 25 日から 10 日間の，深さ 10 cm における地温，土壌水分量と，O_2 濃度，CO_2 濃度の変化を示す．また，同じ期間の時間降雨量（府中市 AMeDAS データ）も併せて示す．ただし，O_2 濃度は，出力値（電圧値）で示している．CO_2 濃度は，温度の日変動とともに最大で 0.2 % 程度変動した．

また，降雨時に土壌水分量が増加すると，それにともない土壌中 CO_2 濃度の上昇及び O_2 濃度の低下が確認された．降雨時の土壌中 CO_2 濃度の増加は既往の研究においても報告されており，体積含水率の増加にともなう気相率低下によりガス拡散移動が抑制されること（中本ら，2002）や，土壌水分量増加にともない微生物活性が高まること（遠藤ら，2010）などによって説明されてきた．本研究で土壌中 CO_2 濃度と O_2 濃度を同時に測定した結果，本研究対象地においては，降雨時の CO_2 濃度増加には，微生物呼吸が寄与していることが示唆された．

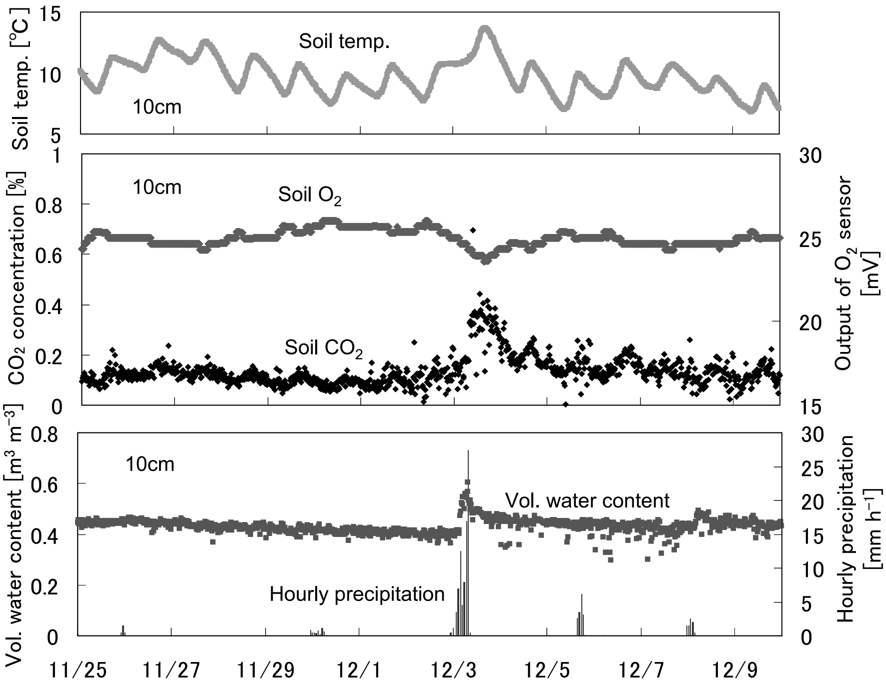

Fig. 9　深さ 10 cm における地温および土壌水分量変化と土壌中 CO_2，O_2 濃度変化.
Response of soil CO_2 and O_2 concentration to soil temperature and moisture at depth of 10 cm.

4. まとめ

本研究では，ガス透過性樹脂と NDIR 式 CO_2 濃度変換器，ガルバニ電池式 O_2 センサを組み合わせたチューブ埋設型ガスモニタリングシステム（遠藤ら, 2010）を，小型化及び高い応答性と土被り圧に対する耐荷重性を両立させることを念頭に改良し，フィールドにおける裸地土壌中 CO_2 濃度変動の検討を行った．応答性の向上のためにはシリコーン樹脂の肉厚を薄くすること，耐荷重性を持たせるためにはチューブの強度を増加させることが必要である．そこで，プラスチックメッシュパイプに肉厚 0.5 mm のシリコーンシートを巻きつけ，円筒状に丸めたステンレス製の網をプラスチックメッシュパイプ内に挿入して強度を増した．このようにシリコーン樹脂の肉厚を従来（遠藤ら, 2010）の 4 mm から 0.5 mm に薄くすることで，大気中における 95 % 平衡時間を 1175 分から 104 分とおよそ 11 分の 1 に短くできた．そして，改良したシステムを農地土壌に適用したところ，土被り圧の大きな深さ 50 cm においても，NDIR 式 CO_2 濃度変換器を保護し，CO_2 濃度の連続モニタリングを行うことができた．

農地土壌は，森林土壌と比べて地温の日，年変動が大きいことを踏まえ，NDIR 式 CO_2 濃度変換器の温度依存性の検討を行った．その結果，温度と出力値（電圧値）には負の相関があり，−10 °C から 40 °C 程度の間では線形関数によって近似でき，同じ型の変換器では同一の傾きが得られた．また，温度補正の基準を 25 °C とした場合，特に深さ 10 cm においては，1 ～ 3 月に，温度補正の有無による RMSE が，NDIR 式 CO_2 濃度変換器の出力値に温度補正を施して算出した土壌中 CO_2 濃度の 0.363 ～ 1.58 倍と大きくなった．

年間を通した農地土壌中の CO_2 濃度連続観測によって，地温の季節変動にともなう CO_2 濃度の季節変動が観察された．また，降雨時に体積含水率の増加とともに CO_2 濃度が増加する現象が捉えられた．その際，同時に測定していた O_2 濃度は減少しており，本研究対象地における降雨時の CO_2 濃度の上昇には，土壌微生物呼吸が寄与していることが示唆された．

謝辞

本研究の一部は，文部科学省気候変動適応研究推進プログラム（代表: 二宮正士）及び科学研究費補助金（基盤研究（A），20248025，代表: 宮﨑　毅; 基盤研究（B），21380142，代表:西村拓），日本学術振興会特別研究員科学研究費の補助によって行われました．東京大学大学院農学生命科学研究科生態調和農学機構の秦野茂氏，久保田浩史氏には圃場の利用で便宜を図っていただきました．また，査読者の方々には原稿の改訂で多くのご意見ご助言をいただきました．ここに記し謝意を表します．

引用文献

Alvaro-Fuentes, J., Morell, F.J., Plaza-Bonilla, D., Arrue, J.L. and Cantero-Marinez, C. (2012): Modelling tillage and nitrogen fertilization effects on soil organic carbon dynamics. Soil Till Res., 120: 32–39.

Coleman, K. and Jenkinson, D.S. (1996): Roth C-26.3 — A model for the turnover of carbon in soil, In: Powlson, D.S., Smith, P. and Smith, J.U. (ed.) Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets. NATO ASI Series I, vol.38, Springer, pp.237–246, Berlin.

Dirksen, C. and Dasberg, S. (1993): Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. Soil Sci. Soc. Am. J., (57): 660–667.

Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T. and El-Rayes, M.A. (1985): Microwave dielectric behavior of west soil— part II: Dielectric mixing models. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, GE23: 35–46.

遠藤敏史, 常田岳志, 井本博美, 西村拓, 宮崎毅 (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, 78(5): 317–323.

藤川智紀 (2003): 耕盤を有する農地土壌中の CO_2 と O_2 の挙動. 土壌の物理性，94: 41–49.

Hirano, T., Kim, H. and Tanaka, Y. (2003): Long-term half-hourly measurement of soil CO_2 concentration and soil respiration in a temperature deciduous forest. J. Geophys. Res., 108 (D20): 7-1 ～ 7-13.

井本博美, 藤川智紀, 溝口勝, 宮崎毅 (2003): 土壌中のガス採取装置の改良とガス採取方法. 土壌の物理性, 93: 51–55.

Kammann, C., Grunhage, L. and Jager, H.J. (2001): A new sampling technique to monitor concentrations of CH_4, N_2O and CO_2 in air at well-defined depths in soils with varied water potential. Europ. J. Soil Sci., 52 (2): 297–303.

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

Lal, R. and Kimble, J.M.(1997): Conservation tillage for carbon sequestration. Nutr. Cycl. Agroecosys., 49: 243–253.

Li, C., Frolking, S. and Frolking, T.A. (1992): A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. J. Geophys. Res., D9: 9759–9776.

溝口康子, 大谷義一 (2005): 小型 CO_2 センサの応答特性比較およびその特性を考慮した出力値の補正法. 農業気象, 61 (4): 217–228.

中本恭子, 神近牧男, 早川誠而 (2002): 砂丘地圃場における土壌中 CO_2 濃度の降水に伴う変化. 日本砂丘学会誌，49(2): 57–66.

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.

農林水産省 (2008): 地球温暖化防止に貢献する農地土壌の役割について. http://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kankyo/pdf/080321-02.pdf (確認 2012/10/17)

Rolston, D.E. (2002): The soil gas phase, In: Dane, J.H. and Topp, G.C. (ed), Methods of soil analysis Part 4. pp.1075–1111, SSSA book series No.5, Madison.

Sundquist, E. (1993): The global carbon dioxide budget. Sci., 259: 934–941.

和穎朗太, Phillip Sollins (2002): 森林生態系における物質循環研究の新しい展開 森林土壌の炭素動態における土壌中水溶性有機態炭素の役割—微生物による二酸化炭素生産との関係—. 日本生態学会誌, 52: 111–117.

柳井洋介, 常田岳志 (2009): ガス透過性膜を用いた土壌ガス採取による土壌微生物活性の原位置計測の可能性. 土と微生物，63(1): 26–31.

要　　旨

土壌中 CO_2 濃度変動を検討するため，ガス透過性を有すシリコーンチューブ，NDIR 式 CO_2 濃度変換器及びガルバニ電池式 O_2 濃度センサを用いた小型の土壌ガス濃度測定システムを作成した．本研究では，シリコーンチューブの肉厚を従来の同様のシステムの 4 mm から 0.5 mm に薄くし，その際，プラスチックメッシュパイプとステンレス製網円筒を芯として埋設時の土被り圧に耐える強度を確保した。その結果，大気中でチューブ内外の CO_2 濃度が 95 % 濃度平衡に達する時間を，従来の 1175 分から 104 分に短縮できた．新システムを用い裸地農地土壌中 CO_2 濃度連続測定を年間を通して行ったところ，降雨時に急激な CO_2 濃度上昇が観察された．同時に O_2 濃度低下が見られたため，降雨に対する CO_2 濃度の応答は，微生物呼吸が寄与していると考えられる．

キーワード：CO_2，土壌呼吸，ガス透過性チューブ，フィールドモニタリング，NDIR 式 CO_2 濃度変換器