

# PC カメラを用いた土壌のガス拡散係数測定 of 半自動化

## Semi-automated Measurement of Gaseous Diffusion Coefficient of Soil Core Samples Using a PC Camera

濱田 洋平\*

Yohei HAMADA\*

### I はじめに

土壌中のガス拡散係数 ( $D_s$ ) は,  $\text{CO}_2$  やメタンといった温室効果ガスをはじめとする, 土壌中にシンク・ソースを持つ気体の土壌-大気間での交換過程を解明する上で重要なパラメーターの1つである. 著者は前稿において, 遅沢 (1987) および遅沢・久保田 (1987) によって開発された, 安価かつ簡便に  $D_s$  を測定する装置を実際に製作し, 測定の手順や誤差の評価法を確立した後, 草地土壌の  $D_s$  測定に適用した (濱田・及川, 2006).

この際に用いた手法のうち, 拡散容器内の  $\text{O}_2$  濃度のモニタリングについては, 測定開始からの経過時間をストップウォッチを用いて計測し, 所定の経過時間ごとに  $\text{O}_2$  濃度センサーの指示値を目視によって確認していた. このため, 測定中は定期的に装置の前に来て記録する手間がかかり, 得られた時系列データの連続性にも限界があった.

測定値を外部へ電氣的に出力する端子が備わっているセンサーの場合は, それを介して外部のデータロガーに測定値を記録することができるが, 本装置で用いた  $\text{O}_2$  濃度センサー (デジタル酸素濃度計 XO-326ALB; 新コスモス電機製) には

出力端子が備えられていない. また, 出力端子を持つタイプのセンサーの中で比較的安価であり, かつ拡散容器側面のセンサー取り付け口のサイズに適合するような他のセンサーも確認できなかった.

そこで本稿では, 近年安価に入手できる PC 接続式の小型カメラ (PC カメラあるいは Web カメラ) を用いて,  $\text{O}_2$  濃度の時系列を連続的にモニタリングする手法を開発した.

### II 方法

#### 1. システムの概要

今回新たに開発した,  $\text{O}_2$  濃度の自動連続モニタリングシステムの概要を第1図に示す.

使用した PC カメラはエレコム株式会社製 UCAM-E1C10 で, 1/7 インチ CMOS センサーを搭載し, 画素数は 10 万, 最大  $352 \times 288$  ピクセルの画像取り込みが可能で, USB ケーブルを介して PC に接続する. このカメラには, 液晶モニター外縁部等に固定するためのクリップが本体下部に備えられており, このクリップでビュレットホルダーを挟み, カメラを下向きに固定した. なお, ビュレットホルダーの反対側には室温測定用

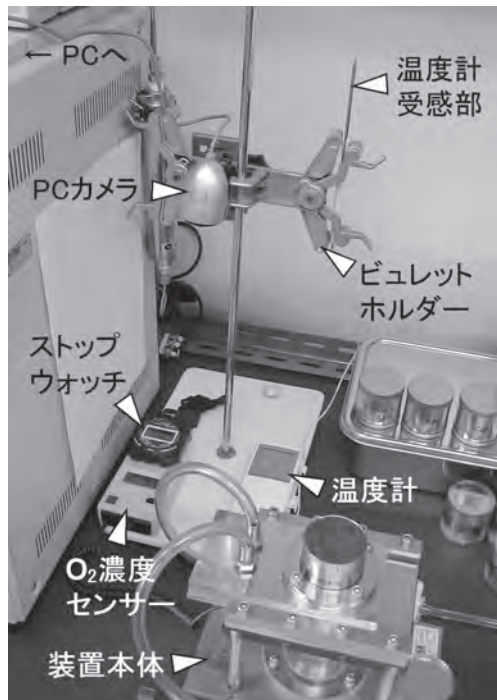
\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

の温度計の受感部を固定した。

次に、カメラの真下に $O_2$ 濃度センサーを置き、正しく写るようにカメラのピント・アングル・高さを調節した。また、センサーの液晶表示部の下に計時用のストップウォッチを置き、測定開始からの経過時間が同一の画像内に記録されるようにした。 $O_2$ 濃度センサー・ストップウォッチともに液晶は反射式であるため、視認性を良くするためにPCカメラの上部にライトを取り付けた。反射光が直接カメラに入ると逆に見にくくなるため、ライトの角度を適宜調節した。

## 2. 画像の自動保存

PCカメラで撮影された画像のPC上での表示および保存には、秀まるお氏制作のフリーソフト「写亀」を使用し、1分間隔でカメラの画像を自動保存した（第2図）。実際の保存間隔はカメラが接続されたPCの内蔵時計に依存するため、ス



第1図  $O_2$ 濃度の自動連続モニタリングシステムの概要

トップウォッチによる計時とは若干のずれが生じるが、その大きさは測定開始から60分後で数秒程度であり、測定結果への影響は無視できる程度であった。

測定開始直後にはスライド部の操作や室温の記録などの作業が入るため、実際には測定開始から1分経過後に自動保存をスタートさせた。この操作により、さらに1分経過後の測定開始2分後からの画像が自動的に保存される。同じ名前の画像ファイルが既に存在する場合、上書き保存しない設定にするとファイル名に自動的に枝番（0番～）が付加されて保存されるが、ファイル管理の利便性を考慮すると枝番と測定開始からの経過時間（分）が一致していることが望ましい。このため、あらかじめ所定のファイル名を持つ画像に加え、枝番0と1が入ったファイル名を持つ画像を保存先フォルダに置いておき、実際の測定時の画像ファイルが枝番2から保存されるようにした。

画像のサイズとして、選択できるものの中で最小の160×120ピクセルを指定したが、このサイズでも $O_2$ 濃度センサー・ストップウォッチともに指示値を明瞭に読み取ることができた。ビデオ形式としてI420、静止画像の保存形式としてJPEGを指定したところ、保存されたファイルのサイズは1つ当たり30キロバイト弱となった。なお、保存先ドライブの残り容量が著しく小さくなると、



第2図 保存されたPCカメラの画像

画像が保存されなくなるので注意が必要である。

測定終了後、枝番2以降の画像ファイルをその土壌試料用のサブフォルダに移動した。

### 3. 測定値の読み取り

一日の測定がすべて終了した後、保存した画像ファイルからO<sub>2</sub>濃度センサーの指示値を読み取った。指示値の読み取りにはK\_OKADA氏制作のフリーソフト「ViX」等を使用し、土壌試料ごとに画像を一覧表示させて行った(第3図)。

一覧表示する画像のサイズは、元の画像と同じか、判読可能な場合にはちょうど縦横半分のサイズに縮小して表示した。このように設定することで、中途半端なサイズに縮小されて画像が劣化

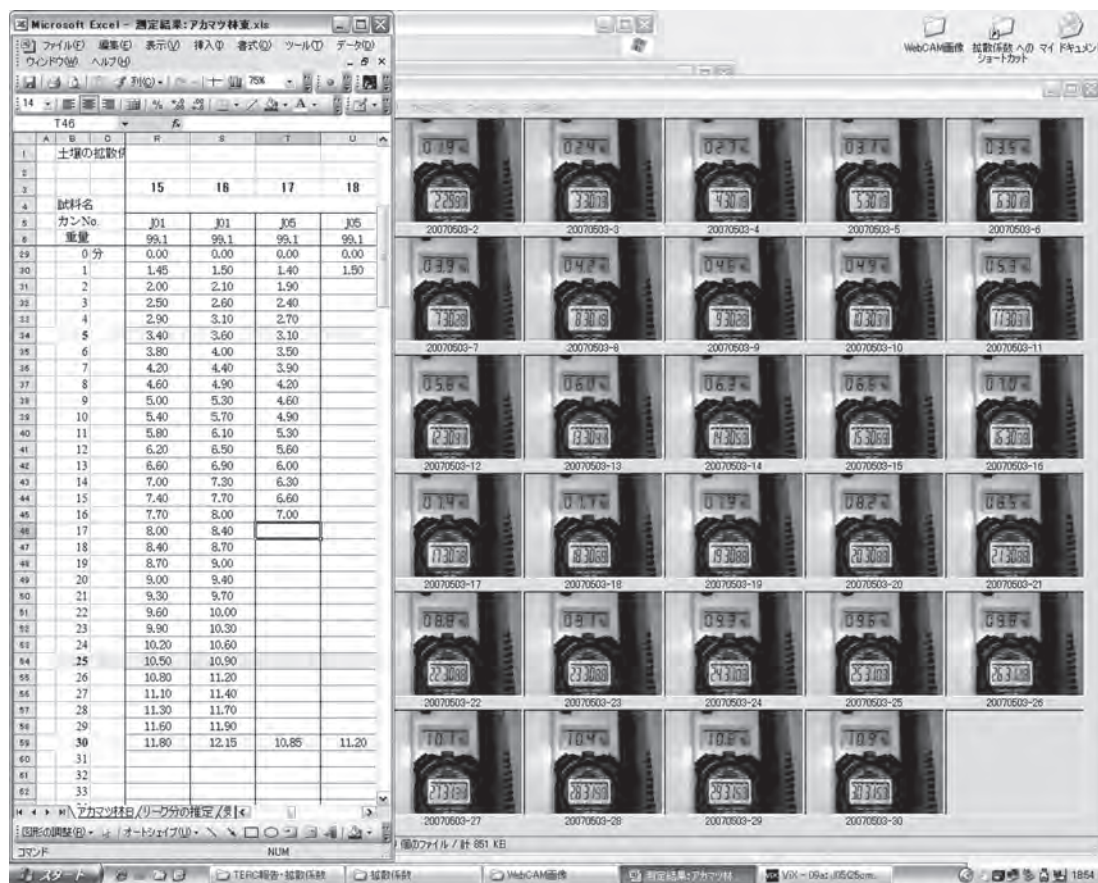
し、指示値が読み取りにくくなる状況を回避した。また、画像を日付順に並べることで、ファイル名に関係なく記録された順に表示させることができる。

このようにして、測定開始2分後以降の画像からセンサーの指示値を順次読み取り、データ処理用のExcelファイルに入力した。

## III 結果および考察

### 1. O<sub>2</sub>濃度の時系列

今回開発した手法を適用して得られた、実際の測定時における連続的な時系列データを第4図に示す。測定に供した土壌試料は、陸域環境研究セ



第3図 保存された画像の一覧表示と読み取った指示値の入力

ンター (TERC) 熱収支・水収支観測圃場の中央部 (濱田・及川 (2006) 第3図に示したB地点の近傍) の各深度から採取した。上側のプロットは1分間隔で記録された拡散容器内のO<sub>2</sub>濃度の指示値, 下側のプロットは次の(1)式の左辺値である。

$$\ln \frac{C(t)-C_i}{C_o-C_i} = -\frac{D_s \alpha_1^2}{\theta_a} t + \ln \left[ \frac{2\theta_a}{L_s} \cdot \frac{1}{L_s \{\alpha_1^2 + (\theta_a/L_s)^2\} + \theta_a/L_s} \right] \quad (1)$$

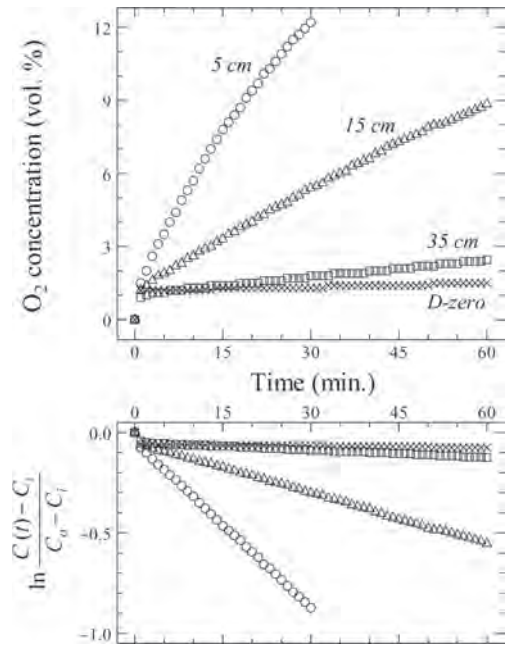
ここで,  $C$  はO<sub>2</sub>濃度を表し,  $C_o$  および  $C(t)$  はそれぞれ初期および時刻  $t$  における拡散容器内の濃度,  $C_i$  は大気中の濃度を表す。  $L_s$  および  $L_A$  はそれぞれ試料円筒および拡散容器の長さ,  $\theta_a$  は土壤試料の気相率である。また  $\alpha_1$  は, 次の(2)式を満たす  $\alpha_n$  の1番目の正の根である。

$$\alpha \tan(\alpha \cdot L_s) = \theta_a / L_A \quad (2)$$

この図と同じ時系列を示した従来の手法に基づくプロット (濱田・及川 (2006) 第4図) と比較すると, O<sub>2</sub>濃度および(1)式左辺値とも変化の傾向自体はほぼ同様であるが, 5~15分間隔のプロットであった従来法に比べて, より間隔の短い今回の手法では経時変化の様子がより明確に示されている。

## 2. $D_s$ の計算

$D_s$  の値は, 第4図下に示した(1)式左辺値の時系列プロットの勾配に基づいて計算される。従来の手法では, 測定開始5分後の値と30分, 45分, 60分後の値とをそれぞれ直線で結んで勾配を出し, その平均値を用いていた。今回は, 統計的な処理を行うのに十分なデータが得られると判断し, 測定開始5分後から測定終了までのデータについて直線回帰を行い, 勾配の値を一意に求めた。



第4図 測定中の拡散容器内のO<sub>2</sub>濃度 (上) および(1)式左辺値 (下)の時系列。数字は土壤試料の採取深度,  $D$ -zeroは拡散係数がゼロの試料を表す

時系列プロットから分かるように, (1)式左辺値はほぼ直線的に変化しており, 回帰直線の決定係数は多くの場合ほぼ1に近い値となった。決定係数と測定時間内のO<sub>2</sub>濃度の上昇量, ならびに求められた相対拡散係数 (大気中の拡散係数  $D_a$  に対する  $D_s$  の比, 以降  $D_s / D_a$ ) との関係を第5図に示す。測定に供した土壤試料は, TERC熱収支・水収支観測圃場内の数地点で, 40 cmまでの深度から採取したものである。回帰直線の決定係数は, O<sub>2</sub>濃度の上昇量で1%以上,  $D_s / D_a$ の値で0.01以上の範囲ではほぼ1に近い値を示すが, これらの値を下回る範囲では急激に減少した。使用したO<sub>2</sub>濃度センサーの分解能が0.1%であり, この値に対してある程度十分な濃度上昇が得られない場合, 回帰直線の相関が悪くなり,  $D_s / D_a$ の測定精度も低下することが分かる。測定時間が短い場合 (25~30分) と長い場合 (50~60分)の間でも, この傾向に差は見られなかった (第5

図上).

### 3. 従来法との比較

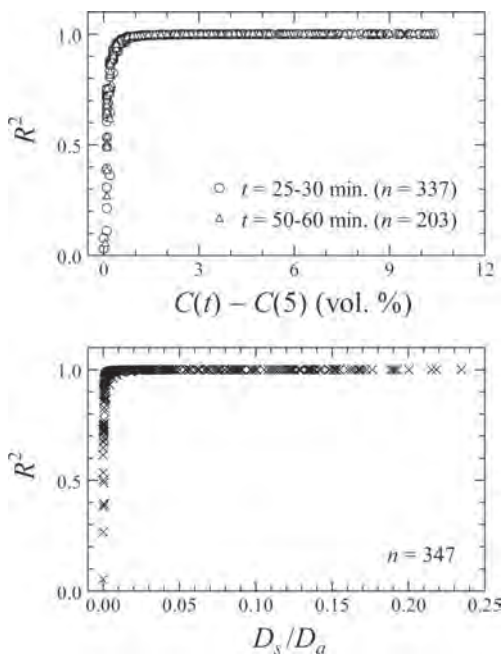
今回の手法で求めた  $D_s / D_a$  の値について、従来の手法で求めた値との比較を行った (第6図). 従来法による値は、今回の手法で得られた連続的な時系列データから、5分、30分、45分、60分のデータを抜き出して計算した.

両者の関係はほぼ1:1で、回帰直線の決定係数もほぼ1となり、絶対値で比較した場合には今回の手法と従来法との間で差はなかった. しかし、今回の手法による結果を真値と見なして相対誤差を計算すると、 $D_s / D_a$  が0.01以下の範囲で手法間の差が拡大し、2~2.5倍の差が生じる場合もあった. この理由として、この範囲では相対誤差の分母である  $D_s / D_a$  自体の値が小さいこと、(1)式左辺値の時系列プロットの回帰直線の相関

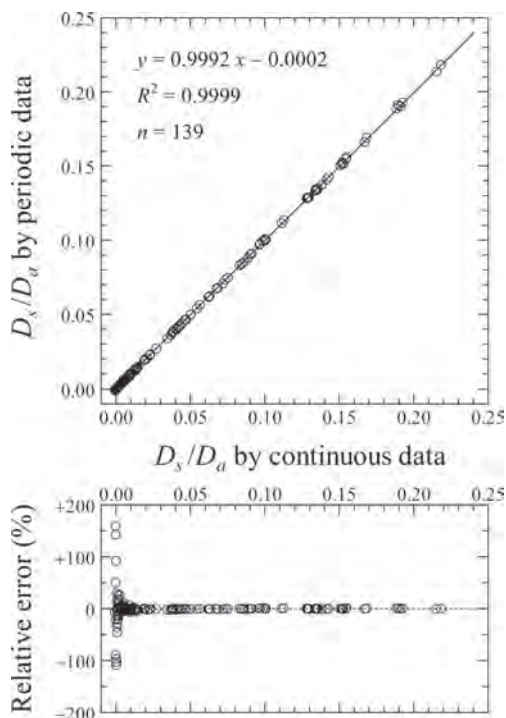
が低いこと (第5図下) に加え、従来法における間隔の長い時系列データに基づく計算では、読み取った値のわずかな違いによって測定値が大きな影響を受けることが考えられる.

## IV まとめ

本稿において開発した、PCカメラを用いて拡散容器内の  $O_2$  濃度を自動モニタリングする手法は、従来法における目視による定期的な指示値の読み取りの手間を省くと同時に、間隔の短い連続的な時系列データを生成することにより、求められた  $D_s$  の確度を高めることに寄与する. また、 $D_s$  が小さく測定中の  $O_2$  濃度の上昇量が不十分な場合に精度が低下する傾向については前稿で既に指摘しているが (濱田・及川 (2006) 第1表ほか)、本稿では (1)式左辺値の時系列プロットの



第5図 回帰直線の決定係数と測定時間内の  $O_2$  濃度の上昇量 (上) および求められた相対拡散係数 ( $D_s / D_a$ ; 下) との関係.  $t$  は測定時間 (分),  $n$  はデータ数を表す



第6図 従来法で求めた  $D_s / D_a$  との比較 (上) およびその相対誤差 (下)

回帰直線の決定係数を用いることで、 $O_2$  濃度の上昇量で 1%,  $D_s / D_a$  の値で 0.01 といった、本装置による測定の精度が低下する閾値を定めることができた。

今回開発した PC カメラを活用したモニタリング手法は、内蔵のデータロガーや外部への出力端子を持たない目視式のセンサーによる測定値を、安価・簡便に自動連続モニタリングするのに応用が可能である。PC カメラについては、現在では今回使用したものよりも高い画素数 (30 万～100 万) のものがおおむね 1 万円以下で入手できる。制御用のソフトウェアについても、カメラに添付されているもののほか、多数の高性能なフリーソフトが開発されている。中には保存した画像を電子メールに添付して指定したアドレスに送信したり、映像に大きな変化が生じたときのみ画像として保存したりする機能を備えているものもあり、

遠隔地にあるセンサーによる測定結果の自動的な回収や、野外に設置した測器の監視等への応用が期待される。

## 文献

- 遅沢省子 (1987): 土壌ガス拡散係数測定と土壌診断. 土壌の物理性, **55**, 53-60.
- 遅沢省子・久保田 徹 (1987): 土壌のガス拡散係数の測定法. 日本土壌肥科学雑誌, **58**, 528-535.
- 濱田洋平・及川武久 (2006): 遅沢式拡散係数測定装置を用いた草地土壌のガス拡散係数の測定. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 71-86.

(2007 年 5 月 9 日受付, 2007 年 7 月 26 日受理)