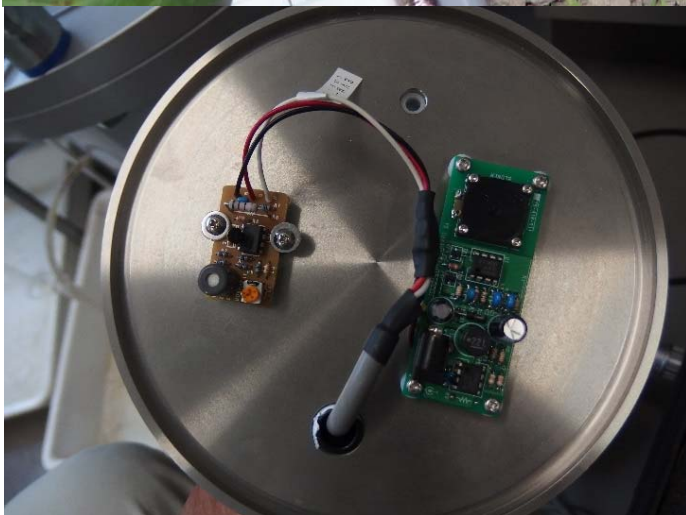


原位置におけるガス拡散係数の測定方法

——圃場のガス移動特性の測定——



国立研究開発法人
農業・食品産業技術総合研究機構
東北農業研究センター

本方法の特徴

——現場に近い条件で圃場のガス移動特性が測定できます——

作物の湿害は酸素不足に起因するため、湿害が多発する日本では物理性改善の目安として土壌のガス移動特性を把握することは重要です。これまで一般的であった方法は、100 mL 容の採土管で採取した土壌を使って、実験室において通気性や拡散特性を測定するものでした。ここで紹介する新しく開発された方法では、実際の圃場（原位置）において 1,800 mL の土壌を対象に、地表から土壌の深部に移動するガスの拡散係数を測定します。

これにより、実圃場で、耕うん後の作土のような大きな土壌構造を持つ圃場のガス移動特性を測定できるようになりました。

このマニュアルの目的

本マニュアルは主に農学系の研究者を対象としています。本マニュアルを読むことによって、ガス拡散係数の原位置測定の方法と操作を理解し、製作するための知識が得られることを目指しています。実際には測定機の自作は難しいため、このマニュアルの仕様に基づいた市販の測定装置の参考資料としても利用できます。

測定の概要と原理

——圃場に円筒を挿し、上部に添加したトレーサーガスの濃度の減衰速度を測ります——

【測定の概要】

上部にガスセンサーがつけられたチャンバーを圃場に挿入します（図1）。次に、トレーサーガスとしてイソブタンガスを添加し、拡散によるガス濃度の減衰速度を記録します。ガスセンサーにはガス警報器等に用いられる半導体式センサーを、トレーサーガスにはカセットガスの成分として流通しているイソブタンガスを利用することで、安価な測定を可能にしています。測定後に土壌の体積および体積水分率を測定します。最後に、誤差関数の計算機能とソルバー機能を持つソフトウェア（例えば Microsoft Excel）を使って、トレーサーガスの減衰速度からガス拡散係数を求めます。

【測定の原理】

ガス拡散係数は、以下の仮定をもとに2頁の囲みで示した拡散方程式(McIntyre and Philip, 1964)を解くことで求めます。
(1) 円筒内の土壌は均一でガス拡散係数は均一であること。

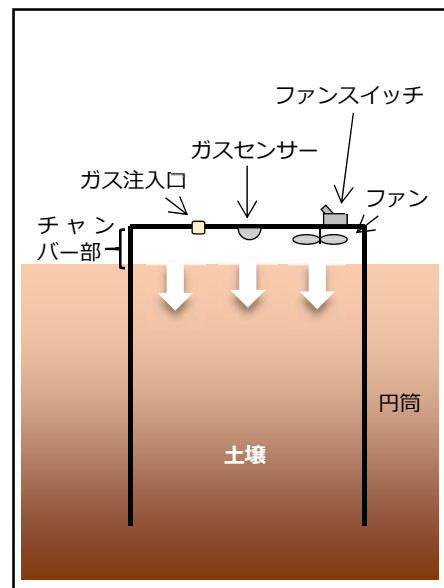


図1 原位置ガス拡散係数測定装置の模式図

(2) 円筒は下方に対して無限に長く、円筒下端からのガスの漏れはないこと。

(3) イソブタンガスの拡散は重力に影響されないこと。

(4) イソブタンガスの液相への溶解、固相への吸着、あるいは土壌からの放出は無視し得ること。

測定時間が長くと円筒の下端からガスが漏れてしまい、(2)の仮定は満たされなくなってしまいます。これを解決するために図2を参照して、下端からのトレーサーガスの漏れが1%未満となる時間までの測定値を使い拡散係数を計算するようにします。

～拡散方程式の詳細～

計算に用いる拡散係数は以下のとおりです。

$$\theta(\tau) = \exp(\tau) \operatorname{erfc}(\tau^{0.5}) \quad (1)$$

ここで、 θ : 無次元化されたトレーサーガス濃度、 τ : 無次元化された時間、 $\operatorname{erfc}()$ は誤差関数。それぞれの変数は以下のように定義します。

$$\theta = c/c_1$$

$$\tau = p^2 D t / V^2$$

c と c_1 は測定時と $t=0$ の時の円筒上部のトレーサーガス濃度。また p は気相率、 V は円筒上部の体積を断面積で割った値、 D は拡散係数を表します。誤差関数は表計算ソフト等で解くことができます。

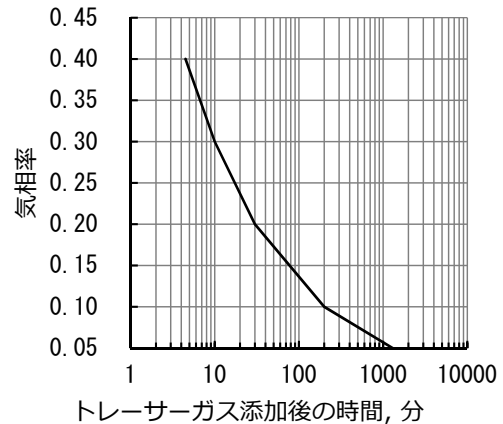


図2 深さ10cmの円筒下端から添加イソブタンの1%が漏れるまでの時間

代表的なデータ (Rolston and Moldrup, 2002) をもとに気相率との関係を求めたもの。

準備するもの

- ・ガス拡散係数測定装置 (写真1)

円筒部と蓋から構成され、蓋にはセンサー、ファンを有するもの。外部からファンはon/offが制御でき、センサーの出力が確認できること。ここで紹介する測定法は円筒の長さが13cmのステンレス製のものを使った場合です。形状が異なる場合は、添加量、測定時間等の調整が必要となります。



写真1 ガス拡散係数測定装置
本体は右。写真のものはログ
が取れる仕様。



写真2 イソブタンガス (左)
とアルミバッグ (右)

- ・ガスタイトシリンジ (0.5 mL 容)
- ・シリンジ (10 mL)
- ・アルミバッグ (写真2)
- ・イソブタンガス (写真2)

カセットガスとして販売されているイソブタンガス濃度 95%以上のものを使います。

- ・ストップウォッチ
- ・ものさし
- ・スコップ
- ・土壌採取用の袋
- ・(必要に応じて) 霧吹き

具体的な測定の手順

1. 事前準備

(1) 装置の大きさの計測

使用開始時に、用いる装置の円筒の高さ L_t 、円筒の半径 r 、センサーおよびファンの体積 V_e を測定しておきます。センサーおよびファンの体積は形状から概算することとし、コード類もすべて含めます。

(2) エージング (注1)

測定を開始する前に円筒のエージングが必要です。エージングを行うことにより円筒の壁面へのイソブタンガスの吸着を防ぎます。2~3 mm 程度水を入れたトレイの上にチャンバーを置き、7 mL のイソブタンガスを添加しファンを回転させます。3 時間静置後、チャンバーを開放して円筒内のイソブタンガスを完全に除去します。この作業を 2 回繰り返します

(3) プレヒート

通電直後の半導体式ガスセンサーは不安定なため、測定前に最低でも 48 時間の通電を行います。

(4) センサーの出力調整

検量線を作成する際には、その前にセンサーの出力を調整します。センサーの出力電圧を確認しながら、センサー基盤の調節ネジを回し、清浄空気下での出力値がおおよそ 1,000mV となるようにします。

(5) 検量線の作成

2~3 mm 程度水を入れたトレイの上にチャンバーを置き、ファンを回転させ、常温で 30 分程度静置します。その後イソブタンガスを 0~0.5 mL 添加し、安定した出力電圧を得ます。この作業を 4 回程度行い、添加ガス量と出力電圧のバックグラウンドからの増加量との関係を図示し、検量線を作成します。検量線は濃度に対し、指数で表現されます (図3)。

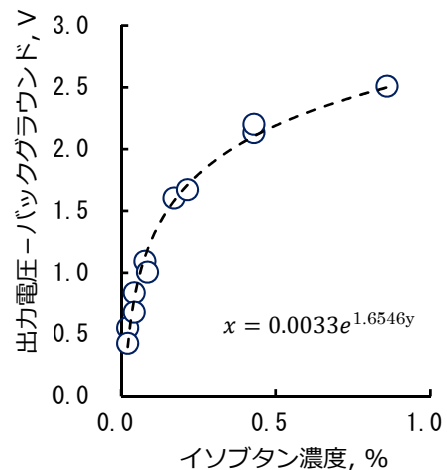


図3 検量線の作成例
検量線は曲線となる点に注意。

2. 測定

- (1) 測定前にはセンサーの電源を入れ、48 時間以上のプレヒートを行い、センサー部を安定させます。

- (2) イソブタンガスをアルミバッグに取り分けます (写真3)。
- (3) 上部 2 cm 程度が露出するように円筒を土壤に挿入し (写真4)、
上部の長さ L を計測しておきます (写真5)。
- (4) 土が乾燥し白くなっている場合は表面を薄く剥ぐか、霧吹きで水を
かけて湿らせます (注2)。円筒内側の土壤との境界に隙間ができ
てしまった場合は少し練って隙間を埋めます。
- (5) 蓋を被せ、ファンを回転させ 40 分程度静置し (注3)、チャンバ
ー内の湿度を平衡させます (写真6)。その後、ガスタイトシリン
ジを使ってアルミバッグから 0.1mL のイソブタンガスをとり、
円筒に添加 (写真7 注4)、ストップウォッチ等で添加時間を
記録します。添加 10 秒後にファンのスイッチを切ります。
- (6) 出力電圧を 1 分間隔で記録します。また、4 分後に 1 分間の間隔でファンをまわし、上部のガス濃
度を一定に保ちます (注5)。
- (7) 土壤の状態に依存しますが、計測時間は 30~60 分が目安です。
- (8) 計測後、蓋をはずし、穴を掘り、円筒内の土壤を回収します (写真8, 9)。回収した土壤は持ち帰
り、新鮮重 W_f と 105℃ の乾燥重 W_d を求めます。



写真3 イソブタンガスの採取



写真4 円筒の埋め込み



写真5 上部の長さの測定



写真6 蓋をする様子



写真7 トレーサーガス
の添加



写真8 土壤の回収



写真9 土壤の回収

3. 計算方法

- (1) 計算には Microsoft Excel 等の表計算ソフトを利用し、2 頁の囲みに示された拡散方程式からイソブタン濃度の減少過程を計算し、ソルバー等を用いてパラメータをフィットさせます (図 4)。2 頁の囲みで示されたパラメータに割り付ける値は 5 頁の表のとおりです。
- (2) 気相率のデータと図 2 を参考にして、1%以上の漏れが発生する時間以降のデータは計算から除外します。
- (3) 添加初期はチャンバー上部のガス濃度が安定しない場合があるので、添加 4 分後以降の値を使って拡散係数を計算することを推奨します。
- (4) ガス拡散係数は相対ガス拡散係数として表現します (表参照)。

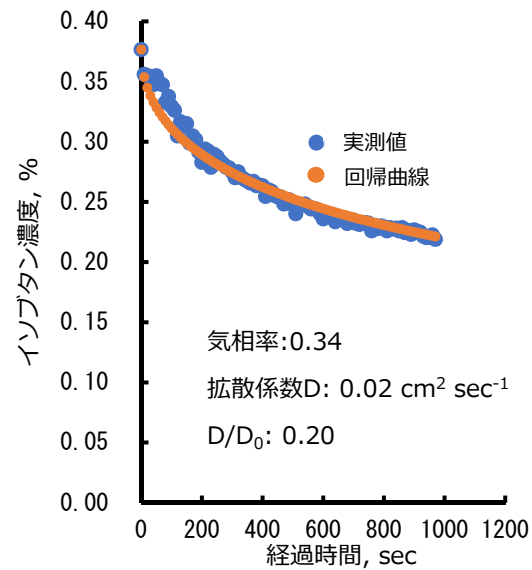


図 4 ガス拡散係数の測定例

表 拡散係数の計算に必要な物理量

項目	単位	求め方
C_1	%	土壌上部の初期イソブタン濃度。ソルバーで求める
C	%	「1. 事前準備 (5)」で求めた回帰式を使って出力電圧から計算
t	sec	「2. 測定 (6)」で計測したストップウォッチの経過時間
L	cm	土壌表面から円筒上端までの長さ。「2. 測定 (3)」で求めた値
L_t	cm	円筒の高さ。測定機の固有値
V_e	cm ³	円筒内のセンサーおよびファンの体積。測定機の固有値
r	cm	円筒の半径。測定機の固有値
ρ	g cm ⁻³	土壌の真比重。実測値がない場合は 2.65 を用いる
W_f	g	採取土壌の新鮮重 (「2. 測定 (8)」)
W_d	g	採取土壌の乾土重 (「2. 測定 (8)」)
V		$(L\pi r^2 - V_e) / \pi r^2$
p		$\{(L - L_t) \pi r^2 - (W_f - W_d) - (W_d / \rho)\} / (L - L_t) \pi r^2$
D	cm ² sec ⁻¹	ガス拡散係数。ソルバーで求める
D/D_0		$D / 0.1021$ (大気中でのイソブタンの拡散係数で除す)

【注釈】

(注1) エージングは毎回行う必要はありません。一度のエージングで半年程度くり返し使用できます。

(注2) 通常、イソブタンの土壌への吸着や水への溶解は問題になりませんが、白く見える程度に乾燥した土壌にはイソブタンが吸着します。表土の剥ぎ取りや霧吹きはこれを避けるためです。

(注3) ガスセンサーは水蒸気にもわずかに反応します。土壌空気の相対湿度はほぼ 100%ですので、この雰囲気下にチャンバーを平衡させる必要があります。また、湿度は温度の影響を受けるために、測定中に急激な温度の変化がないようにします。

(注4) シリンジにはガスタイトシリンジを使います。シリンジはアルミバッグ内で2～3回動かして、均一なガスを取り、円筒に挿入後は一気に注入し、すぐに抜くようにします。

(注5) イソブタンガスの分子量は 58 g mol^{-1} と空気の平均分子量 (28 g mol^{-1}) に比べて大きいため、下方へ沈みやすい傾向があります。これを避けるためにファンを回し時々空気を攪拌します。

参考文献

McIntyre, DS and Philip JR (1964) A field method for measurement of gas diffusion into soils, *Aust. J. Soil Res.*, 2, 133-145.

Rolston, DE and Moldrup, P (2002) Gas diffusivity, *In* Method of soil analysis Part 4 Physical Methods, (eds. Dane, JH and Topp, GC), Soil Science Society of America Inc., Wisconsin, pp1131-1137.

測定機器の入手先と問い合わせ

上記の仕様に準拠した測定装置が市販されています（平成 30 年 5 月販売開始、予定価格は 30 万円前後。本マニュアルの写真と機器の仕様が若干異なります）。装置の購入等については、農研機構東北農業研究センターにお問い合わせください。

【執筆者】

農研機構東北農業研究センター 高橋智紀

【お問い合わせ先】

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター
水田作研究領域（大仙研究拠点）

住所：〒014-0102 秋田県大仙市四ツ屋字下古道 3

電話：0187-66-1221、FAX：0187-66-2639

本マニュアルは、農林水産省委託プロジェクト研究「収益力向上のための研究開発（課題名：多収阻害要因の診断法及び対策技術の開発）」で実施された研究成果によるものです。

転載、複製をする場合は、国立研究開発法人農研機構東北農業研究センターの許可を得て下さい。