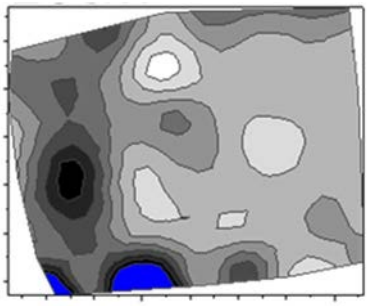
SOP20-413K

禁転載

圃場オンサイト計測による簡易な土壌物理性診断の標準作業手順書

公開版



農研機構

改訂履歴

版　数	発行日	改訂者	改訂内容
第 1 版	2021 年 4 月 16 日	松村　正哉	初版発行

2023 年 3 月 14 日版

目次

はじめに～土壌物理性診断の現状と課題～ **1**

免責事項 **3**

Ⅰ．技術の概要 **4**

Ⅱ．土壌構造の診断（土塊分析） **6**

１．　本技術のポイント 6

２．　作業手順 6

３．　現地調査の概要 12

４．　技術の導入手順 16

Ⅲ．下層土の物理性診断（貫入硬度の解析） **17**

１．　基礎編 17

1.1.　本技術のポイント 17

1.2.　作業手順 18

1.3.　現地調査の概要 20

1.4.　技術の導入手順 22

２．　応用編（圃場における土壌硬度の三次元分布） 22

2.1.　本技術のポイント 22

2.2.　作業手順 23

2.3.　現地調査例 28

Ⅳ．透水性の診断（畑の透水係数の測定） **29**

１．　本技術のポイント 29

２．　作業手順 34

３．　現地調査の概要 39

４．　技術の導入手順 40

Ⅴ．通気性の診断（ガス拡散係数の測定） **42**

１．　本技術のポイント 42

２．　具体的な作業手順 43

３．　現地調査の概要 49

４．　注釈 50

５．　技術の導入手順 51

用語解説 **52**

参考資料 **56**

担当窓口･連絡先 **57**

はじめに
～土壌物理性診断の現状と課題～

1.土壌物理性診断の今日的な意義

近年、水田作を中心に土壌物理性の診断の重要性が高まってきています。その大きな理由として、第一に、現在では水田の多くが転換畑として畑作に充てられており、畑作物の生育は圃場の排水性に影響されてしまうことが挙げられます。2019 年度の水田の作付（栽培）延べ面積のうち、34%は水稲以外の品目の作付です（出典：農水省 面積調査『令和元年農作物作付（栽培）延べ面積及び耕地利用率』）。水田は水を貯めて使う圃場ですが、畑転換した際には排水性を十分確保しなくてはいけません。圃場の排水性が十分か判断するためには、土壌物理性の診断は有効なツールです。第二の理由として、水田作農家の保有するトラクターが大型化し、営農的な排水対策が比較的容易になったことが挙げられます。従来の基盤整備事業と異なり、営農排水では生産者が各自の判断で排水対策を講じることができます。一般的には、土壌物理性が悪いことが排水不良の元とされますが、これに問題はなくとも、地下水位、地形、明渠・暗渠網のつまりによって排水不良となる場合があります。また、土壌のタイプ等によって、土壌物理性改良効果の持続性が異なる場合もあります。圃場条件や生産者の保有機械に合わせた排水対策を行うためには、その前に土壌物理性の診断が欠かせません。

2.オンサイト計測の重要性

土壌物理性の診断では、これまで不かく乱の試料をラボに持ち帰り、正確に制御された環境下で測定することが一般的でした。これは厳密な値を求めるためには必要なことですが、圃場の診断では、正確さを多少犠牲にしてでも、簡便に診断を行い、生産者の意思決定に貢献することが優先されます。また、土壌物理性は土壌化学性と異なり、地理的な条件が診断値の考察に大きく影響します。例えば粘土含量が多い圃場でも、その圃場

が周囲に比べて高い位置にあるか低地にあるかによって作物への影響は異なります。したがって、土壌物理性は地理的な諸条件を考慮し、現場で計測することが大きな意味を持ちます。時には生産者に物理性を体感してもらいながらコミュニケーションをとれるのもよい点です。私たちはこのような現場での測定をオンサイト計測と呼んでいます。オンサイト計測による土壌物理性の評価技術は今までにも存在していましたが、これらに特化し手順から診断までを体系的に提示した例はありませんでした。また、一部の技術は論文公表の段階にとどまっており、装置の入手が困難であったり、専門家以外には活用が難しい手法がありました。

農研機構では、上のような現状と問題意識を踏まえて、オンサイト計測技術を診断技術へと高めるための技術開発を行いました。具体的には、既存の手法を整理し診断に活用するための測定条件や新しい応用技術を提示した成果、導入が困難だった手法について装置の市販化により入手経路を整備し、さらには診断手順を確立・提示した成果、あるいは、既存の測定原理を応用し新たな装置を開発した成果が含まれています。この手順書では、このような取り組みの中で現在までに得られた４つの診断技術を紹介しています。紹介する技術はわずかな作業を除き、ほとんどの手順をオンサイトで簡易に行うことができるため、土壌物理性診断の普及を促進することが期待されます。

■ 免責事項

- 農研機構は、利用者が本手順書に紹介された技術を利用したこと、あるいは何らかの理由で技術が利用できないことで、もたらされる結果について、一切責任を負いません。
- 本手順書に紹介された土壌物理性の測定結果は、農研機構で得られた一例です。土壌条件、地域、気候条件、その他の条件により変動することをご留意ください。手順書に記載された技術の利用により、この通りの効果が得られることを保証したものではありません。
- 本手順書で紹介する測定機器の操作については、メーカーのホームページや取扱説明書等をご参照ください。また、価格についても本書を作成時点での参考価格であり、購入に当たってはメーカーや取り扱い店にお問い合わせください。

Ⅰ．技術の概要

技術のポイント

★４つの技術から選んで圃場で土壌物理性を診断（表Ⅰ-1）

①圃場におけるオンサイト計測を実現

→導入が簡単で判断しやすい。

②単なる計測技術ではなく、診断技術として提示

→対策技術へと展開しやすい。

③作土から下層土まで、水移動からガス移動までの幅広い診断法を網羅

→疑問点に対応する技術が揃っている。

表Ⅰ-1 本手順書で紹介した４つの技術の概要

	こんな時に	ページ	導入対象	オンサイトで完結するか	診断する形質	必要な装置	対応する旧来の方法	改善技術
土壌構造の診断	土壌構造を、ごく簡単に調べたい！	p. 6	普及員・研究者等の専門家、農業生産者	完結、またはほぼ完結	・乾燥密度 ・粗間隙量	土塊サンプラー	採土管で採取後、ラボ分析	・排水対策 ・有機物施用 ・緑肥作物の導入
下層土の物理性診断	硬盤等の位置を手軽に知りたい！ 下層土の様子を面的に把握したい！	p. 17	普及員・研究者等の専門家	完結	・硬盤等の位置 ・土壌構造の空間分布 ・圃場の水移動の推定	貫入式土壌硬度計（コーンペネトロメーター）	土壌断面の調査	・明渠施工 ・補助暗渠の施工
透水性の診断	耕盤等の排水性が知りたい！	p. 29	普及員・研究者等の専門家	完結	・透水性 ・畑状態での透水性	負圧浸入計	採土管で採取後、ラボ分析	・明渠施工 ・補助暗渠の施工
通気性の診断	根の伸張に酸素が十分か知りたい！	p. 42	普及員・研究者等の専門家	ほぼ完結	・ガス拡散係数	ガス拡散係数測定装置	採土管で採取後、ラボ分析	深耕

Ⅱ．土壌構造の診断（土塊分析）

1.本技術のポイント

（1）圃場の土壌構造を簡易に把握できます

土壌構造（p．55 用語解説）は、土壌粒子とそのすき間（間隙）によって形成されます。比較的大きな間隙（粗間隙、p．54 用語解説）は土壌の排水性や通気性に影響します。細間隙は水を保持することができるので、土壌の保水性を高めます。このように土壌構造は、圃場の通気性や排水性、保水性を左右する重要な土壌物理的特徴です。しかし、その状態を把握することは必ずしも容易ではありません。様々な方法が提案されていますが、ここでは専門家でなくとも簡単にできる「土塊分析法」を紹介します。

（2）測定の概要

土塊分析法は、①土塊を採取する工程と、②土塊を落下砕土して篩分けする工程の 2 つに分けられます。土塊の落下砕土は、土塊採取後すぐに現場で実施できますが、土塊を持ち帰り、風乾して後日実施することも可能です。

2.作業手順

（1）土塊の採取に使用する道具

①肥料桶（肩掛けつき）：採取した土塊などの圃場内運搬用。

②ポリ袋（45L 程度）：土塊収納用。厚手（0.05mm 以上）が良い。

③土塊サンプラー：下記に詳細説明あり。

④掛け矢（樹脂製ヘッド）：土塊サンプラーを打ち込むために使用。

⑤スコップ：打ち込んだ土塊サンプラーを掘り取るために使用。

⑥シリコンスプレー：土塊サンプラー表面に予め塗布。土塊の付着軽減のため。

⑦ヘラ：土塊サンプラーに付着した泥落とし用。

図Ⅱ-１　土塊の採取に使用する道具

（2）土塊の採取方法

土塊は、耕起前または収穫後の圃場から、縦横 15～20cm、深さ 20cm、くらいのものを採取します。深さはできるだけ正確に 20cm とします。土塊を採取するには、スコップがあれば可能ですが、土塊サンプラー（図Ⅱ-２）を使用すると作業効率が大変よくなります。

図Ⅱ-２　土塊サンプラー

土塊サンプラーは、縦 15cm 横 15cm 高さ 20cm の直方体を縦割りした形の金属枠です。２個を１組にして使用します。写真は 1.5mm 厚の鋼板で自作し

たものですが、業者から購入することもできます。土塊を採取している様子を図Ⅱ-３に示します。

図Ⅱ-３　土塊を採取している様子

土塊サンプラーを打ち込む時は、天板の中央は変形しやすいので、できるだけ四隅の辺をたたくようにします（A）。サンプラーを壊さないように掛矢の打撃部分は樹脂製です。打ち込んだ後（B）、土塊サンプラーの外周の土を取り除いて、サンプラーごと土塊を掘り上げます（C）。このとき、サンプラーよりも下にスコップを差し込み、テコの要領で少しずつ持ち上げます。サンプラーの底面からはみ出した部分はスコップでそぎ落とします。土塊をなるべく壊さないようにサンプラーを取り外し（D）、

45L のポリ袋に回収します。あとでポリ袋ごと砕土するので、厚手のもの（0.05 mm 以上）を使用します。

粘質な土壌では、土塊サンプラーに土が張り付いて、うまく剥がれない時があります。そのような土壌では、予めサンプラーの表面にシリコンスプレーを塗布しておくと付着が軽減されます。土塊を運ぶ時は、肩掛けつきの肥料桶を使用すると便利です。ヘラは、土塊サンプラーに付着した土壌を落とす時に使います。

（3）土塊の砕土と篩分けに使用する道具

⑧コンテナボックス：土塊を落下破砕する際の飛散を防ぐために使用。

⑨桶：秤量するときの容器

⑩ばんじゅう（３枚）：篩の受け皿に使用。分画した土塊の撮影にも便利。

⑪受け板：コンテナの底に敷く。写真は 15mm 厚の合板を使用。

⑫厚手のビニール袋：土塊の落下破砕で使用。採取時の袋でもよい。

⑬秤：土塊の秤量に使用。最大重量が 5kg 以上のもの。

⑭篩（小）：土塊の二次分画に使用する。篩目 4.75mm。

⑮篩（大）：土塊の一次分画に使用する。篩目 31.5mm。

図Ⅱ-４　土塊の砕土と篩分けに使用する道具

（4）土塊の砕土と篩分け

土塊の砕土は、採取後すぐに現場で実施することもできますが、調査する圃場数が多い時は、土塊を持ち帰って後日実施します。また、土壌水分が高すぎる時は、土塊を落としても変形してしまい砕土がうまくできません。土壌表面を指で押して変形する場合は、土塊を持ち帰り、風乾して後日実施します。図Ⅱ-５は、採取した土塊を温室で風乾した様子です。表面全体が乾いているかを目安にします。

図Ⅱ-５　土塊を風乾した様子

図Ⅱ-６　土塊の砕土

土塊の砕土は、ポリ袋ごと約１ｍの高さからコンテナ内に落として行います（図Ⅱ-６）。コンテナ内には土塊落下時の衝撃が安定して伝わるように丈夫な板（厚さ15mm程度、図Ⅱ-４参照）を敷いています。これを３回繰り返します。ポリ袋が薄いと砕土の時に破れる場合が多いので、厚手のポリ袋を使用します。

次に篩分けを行います。通常は、31.5mm と 4.75mm の２種類の篩を使います。篩目の大きいものを上から重ねて篩い（図Ⅱ-７）、３つの画分に分けて（図Ⅱ-８）、各画分の重さを量って重量比を求めます。

図Ⅱ-７　篩分け作業の様子

図Ⅱ-８　土塊を篩分けした後の様子

(5) 補足

現場で砕土・篩分けして重量測定を行う場合は、篩や秤などの道具を現場に持って行く必要があります。今後、参照写真を準備して比較参照する方法を確立すれば、篩分けや重量測定を省略することが可能になると考えられます。

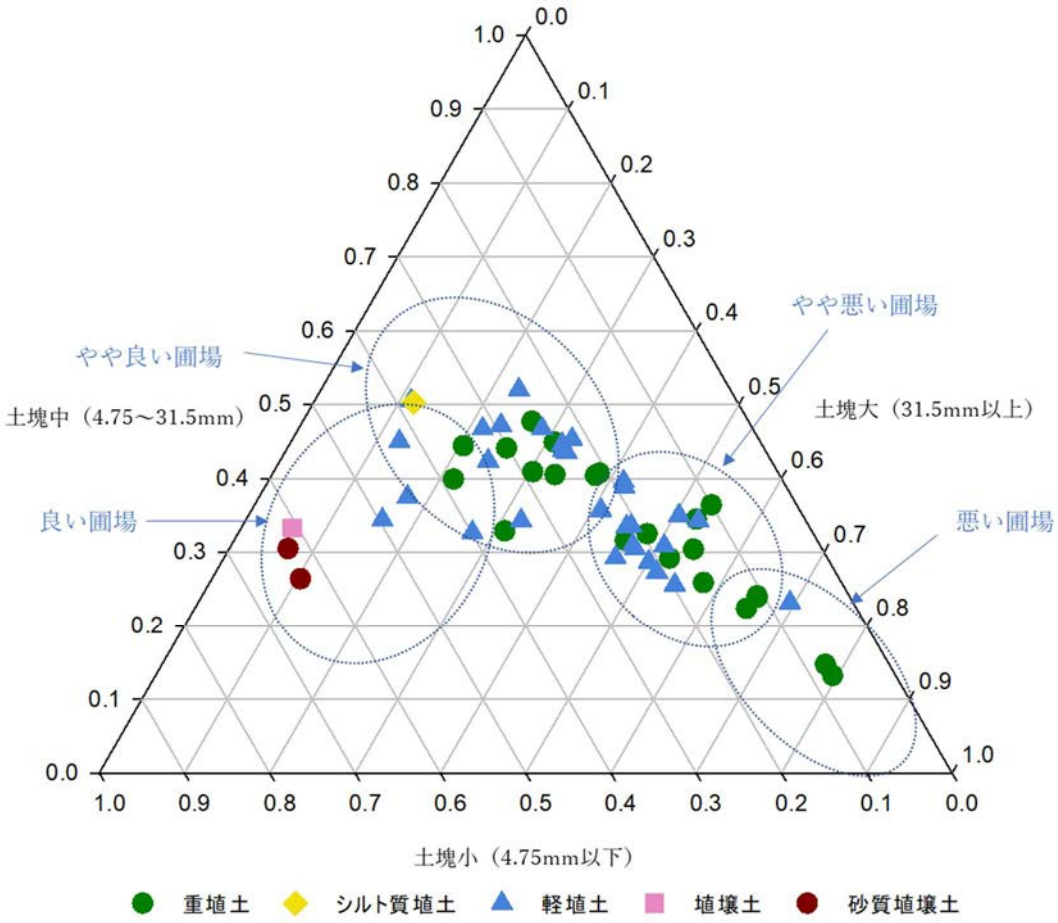
土壌の砕土性は、土壌水分の影響を受けることが分かっています。土塊分析で土塊の壊れやすさを正確に調べるには、土壌水分をそろえる方がより良いのですが、実際には、水分をそろえることは簡単ではありません。採取した土塊を風乾することは、時間はかかりますが、水分の影響を少なくすることができます。また、現場の水分で砕

土した時と、風乾後に砕土した時の比較を、いくつかの圃場で実施していますが、土壌構造の評価が大きく変わるほどの影響はこれまで認められていません。

3.現地調査の概要

(1) 土塊分布の調査例

北海道での調査事例を図Ⅱ-9 に示します。3 つの土塊画分割合（重量比）を三角図で示しています。全部で 56 地点の調査事例です。土塊小が多く、土塊大が少ない圃場は、土壌構造が発達した良い圃場です。反対に土塊小が少なく、土塊大が多い圃場は、土壌構造の発達が悪い圃場です。土壌構造は乾湿の繰り返しや有機物の施用、植物根の侵入等で発達します。土壌構造の発達が悪い圃場では、排水対策や堆肥の施用、緑肥作物の導入などを進めましょう。

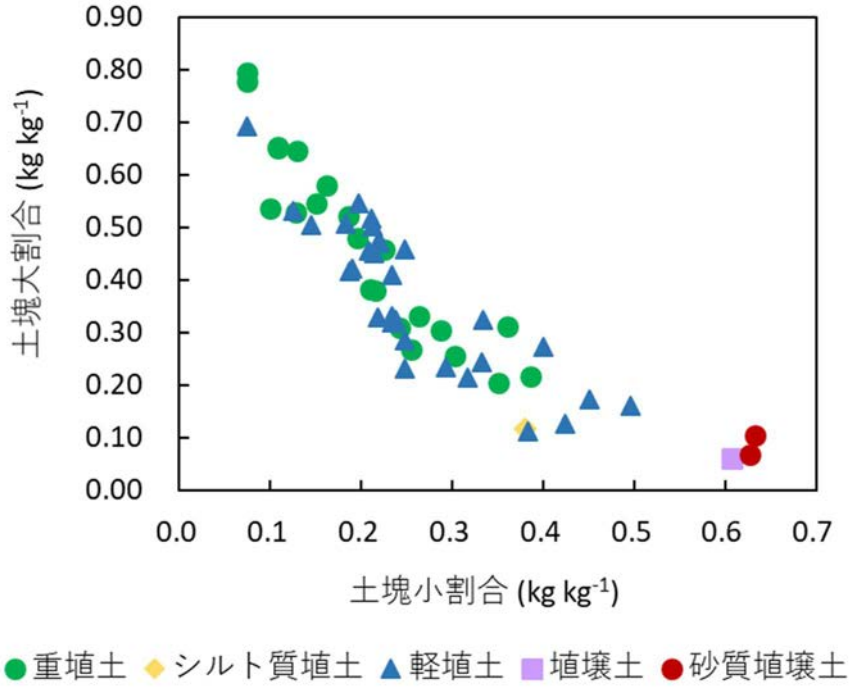


図Ⅱ-９　土塊分布の調査事例

岡ら 2021(土肥誌)から引用。
矢印が示す「良い」、「悪い」は土壌構造の状態を指す。

(2) 土塊小割合と土塊大割合の関係

上記の調査事例から、土塊小割合と土塊大割合との関係をプロットしました（図Ⅱ-10）。両者が非常に強く相関していることが分かります（ｒ＝－0.883）。したがって、土塊分布を評価する時は、土塊小割合か土塊大割合のどちらかに注目すれば、良いことになります。



図Ⅱ-10　土塊小割合と土塊大割合との関係

岡ら 2021(土肥誌)から引用。

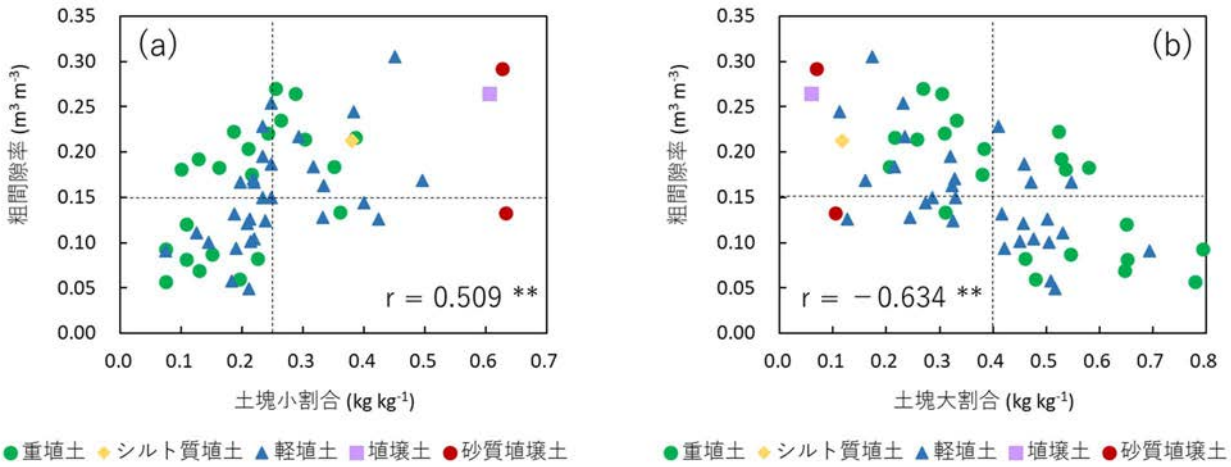
(3) 土塊分布と粗間隙率・乾燥密度との関係

土壌構造の指標としてよく測定される項目に粗間隙率と乾燥密度（p. 52 用語解説）があります。粗間隙率は、土壌の単位体積当たりの粗間隙の体積です。排水性や通気性に寄与する間隙量です。乾燥密度は、土壌の単位体積当たりの土壌固相の質量です。乾燥密度が高いと土壌が密になっているので間隙が少なく土壌構造の発達が悪いことになります。以下では土塊分布と粗間隙率・乾燥密度との関係を見ていきます。

(3)-1 土塊分布と粗間隙との関係

図Ⅱ-11 は、土塊小割合（a）または土塊大割合（b）と粗間隙率との関係です。強くはありませんが、有意な相関関係が認められます。土塊小割合が少ない圃

場では、粗間隙率が小さくなっていて、土壌構造があまり発達していないことが分かります。図Ⅱ-11 をみると、土塊小割合が 0.25 以下、あるいは土塊大割合が 0.4 以上の時に、粗間隙率が 0.15 以下になる可能性が高いことが分かります。粗間隙率が 0.15 以下の土壌は、根の伸長の閾値（ガス拡散係数 $D/D_0 = 0.02$）を下回るリスクが高い土壌です（「Ⅴ．通気性の診断」の図Ⅴ-7 で説明されています。毛管水として保持できない水が排出された時の気相率は粗間隙率と同じです）。このような土塊分布の時は、通気性に問題がある可能性が高いと言えるでしょう。



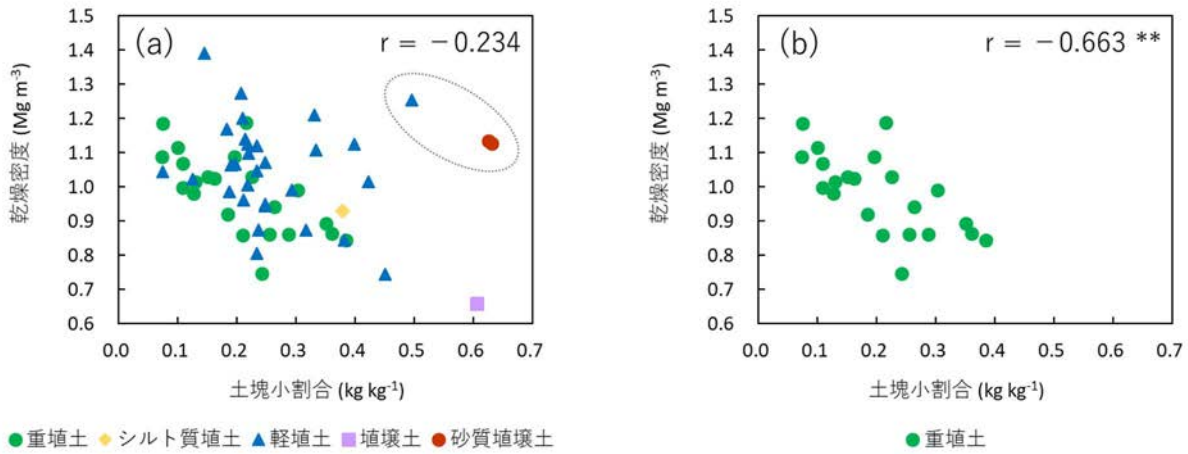
図Ⅱ-11　土塊小割合・土塊大割合と粗間隙率との関係

ここでの粗間隙率は pF1.5（−3.1 kPa）の間隙率とした。
岡ら 2021(土肥誌)から引用。** は 1 %水準で相関係数が有意であることを示す。

(3)-2 土塊分布と乾燥密度との関係

図Ⅱ-12a は土塊小割合と乾燥密度との関係です。全体をみると有意な相関関係は認められません（r ＝ −0.234）。しかし、砂割合が 50%以上もある試料（図Ⅱ-12a の右上の 3 点）を除くと、有意な相関関係（r ＝ −0.504）が認められます。砂割合の高い試料は密度が高いわりには（土壌構造の発達が悪くても）砕土されやすい性質があるので注意が必要です。また、重埴土の試料に限ってみると

（図Ⅱ-12b）、相関係数はさらに高くなります（ｒ＝－0.663）。土塊分析結果を比較する場合は、類似する土性で行うと良い比較ができることが分かります。



図Ⅱ-12　土塊小割合と乾燥密度との関係

岡ら 2021(土肥誌)から引用。** は１%水準で相関係数が有意であることを示す。
(a) の点線内は砂割合が 50%以上の試料

4.技術の導入手順

土塊サンプラーの購入先

大起理化工業、エンドウ理化、価格は一式３～４万円程度

Ⅲ．下層土の物理性診断（貫入硬度の解析）

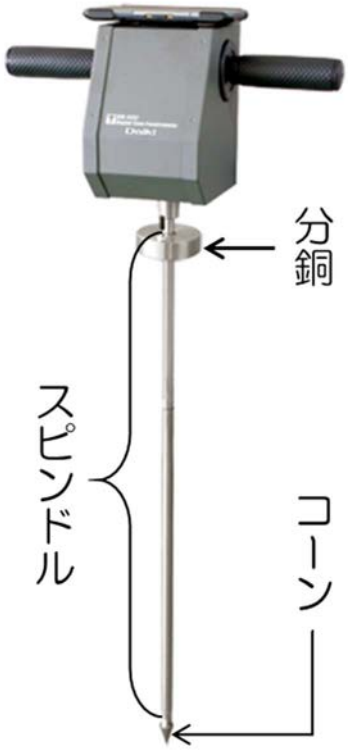
1.基礎編

1.1．本技術のポイント

（１）穴を掘ることなく下層土の状態を推測できます

下層土（p. 52 用語解説）が硬く締まっていると、根の伸長を妨げるだけでなく、排水の障害にもなるため、排水不良を引き起こし、作物の健全な生育が妨げられます。そのため、下層土の状態を知ることは、良好な農業生産のためにも重要です。しかし、下層土の状況は地表からはわからないので、穴を掘るなどして調べることになりますが、労力が必要になります。そこで、労力をかけずに、下層土の状況を知るために開発されたのが、貫入式土壌硬度計（コーンペネトロメータ）です。

貫入式土壌硬度計は先端がコーン型になっているスピンドルを土中に差し込み、深さ毎に貫入時の抵抗値（貫入抵抗）を感知し、記録する機械です。以前は、紙に記録するものでしたが、近年はスマートフォン等のデジタルデバイスを活用して、電子情報として記録するものが大起理化工業から発売されています（図Ⅲ-1）。



図Ⅲ-1 デジタル貫入式土壌硬度計（大起理化工業 HP から引用）

（２）作土層厚や耕盤層の位置を特定できます

貫入式土壌硬度計を用いた貫入抵抗値分布を見れば、作土層厚（p. 54 用語解説）や耕盤層（p. 52 用語解説）の位置もその測定結果から特定できます。ここでは耕盤層を土壌の硬盤から判断する方法（p. 17）と、圃場全体からみたすき床（p. 54 用語解説）の位置から判断する方法（p. 22）を紹介します。

1.2. 作業手順

（1）準備するもの

・貫入式土壌硬度計（DIK-5532）（スピンドル 60cm の場合約 3.5kg、90cm の場合約 3.7kg（表示器・電池込み））

・雑巾

・タッチスクリーン対応手袋／タッチペン（手袋を外さずに作業できるので、便利です。）

（2）測定前の準備

・貫入式土壌硬度計（DIK-5532）を組み立てます。スピンドルの長さは、30/60/90cm から選べます。また、コーン部はスピンドルの長さによって異なるので注意して組み立てます。

（3）測定手順

・測定場所を決めます。足跡や轍、枕地等の表面が乱されたりしているようなところでの測定は、極力避けるように決めます。

・貫入式土壌硬度計の分銅部分を引き下げます。（図Ⅲ-2 a））

・肩幅より少し広く脚を広げ足場を確保します。（図Ⅲ-2 b））

・操作画面を使って、測定を開始します。（図Ⅲ-2 e））

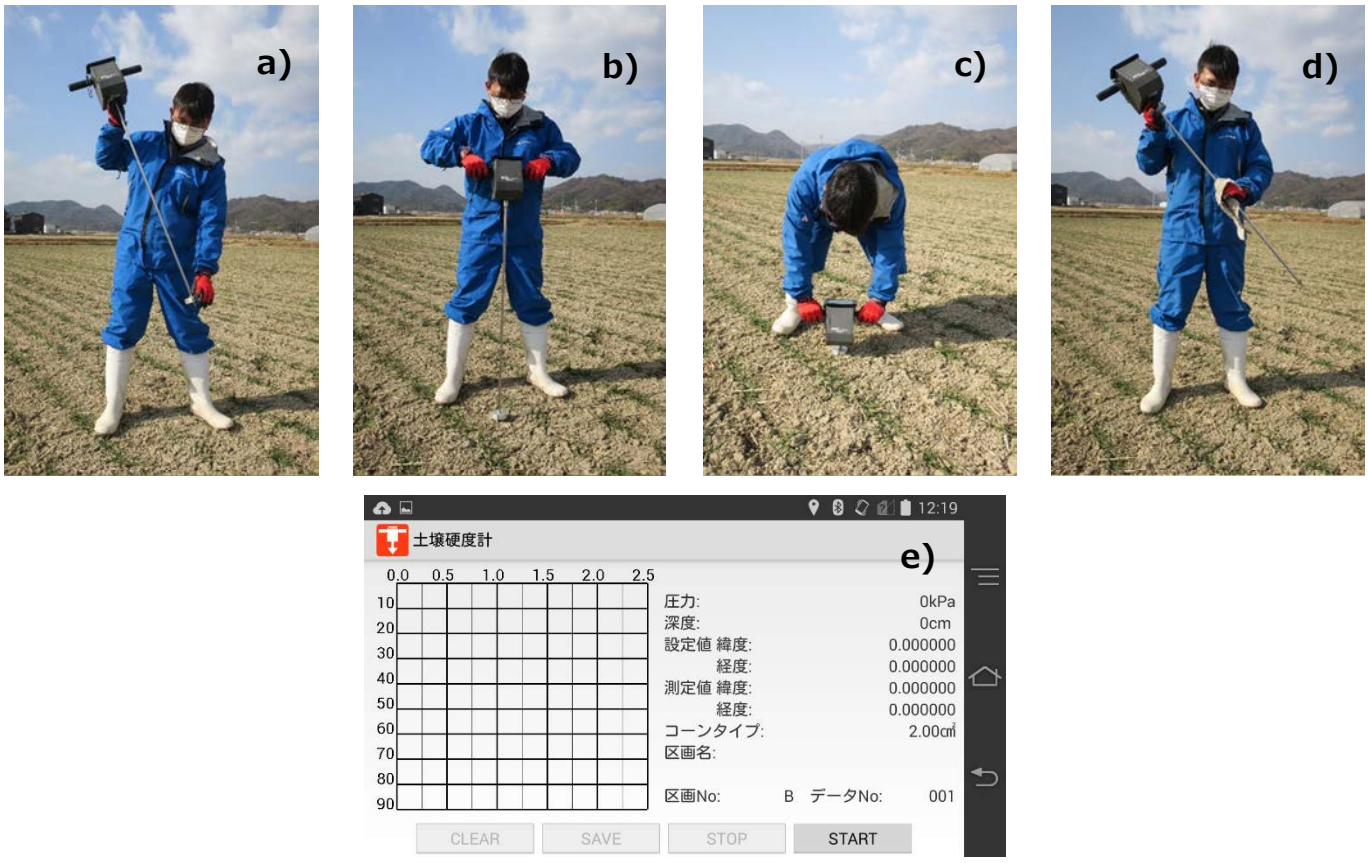
・機械の水平を保ちながら１秒間に 1cm 程度のスピードで、土壌中に挿入します。

大起理化工業の貫入式土壌硬度計の場合、操作画面にガイドが表示されますので、測定値がガイドを追い抜かないように気をつけて挿入します。挿入時は、上半身をアクセルに、両膝をブレーキにするイメージで挿入すると、突然柔らかい層があった場合にも測定値の跳びを防ぐことができます。

・途中でスピンドルの挿入が不可能になった場合（測定可能範囲以上の硬さの土壌層や礫等に当たる等）や既定の深さまで挿入した場合には、操作画面を使って測定を終了し、データを保存します（図Ⅲ-2　c）、e)）。

・挿入したスピンドルを土壌から抜き取ります。腰に負担がかかることがあるので気をつけて引き抜きます。

・引き抜いたスピンドルとコーン部分に付着した土を、雑巾で拭き取ります（図Ⅲ-2　d））。

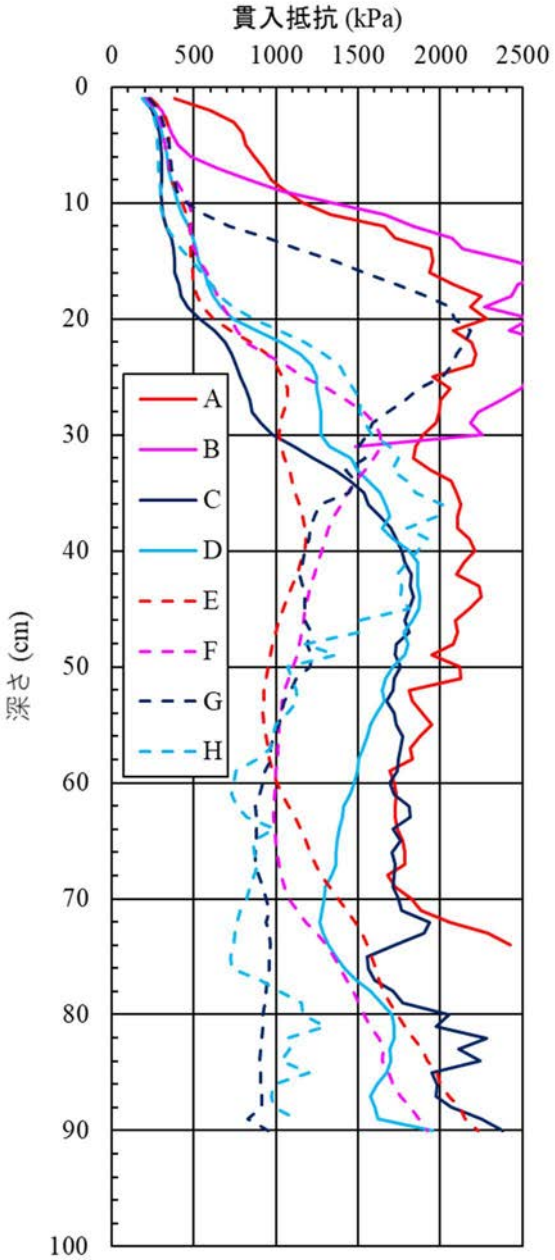


図Ⅲ-2　貫入式土壌硬度計の測定手順

1.3. 現地調査の概要

(1) 下層土の状態

小麦作期間中の水田転換畑 8 圃場における貫入式土壌硬度計の測定結果を図Ⅲ-3に示しました。A 圃場では深さ 25cm 以深では、ほぼ一定の値（2,000kPa）を示しており下層土が詰まった状態であることを示しています。一方、H 圃場では深さ 35cm 以深で徐々に貫入抵抗が低下し、詰まった状態から緩んだ状態に変化し、さらに 60cm 以深では緩んだ状態が続いていることを示しています。また、B 圃場は 15cm 以深で土壌が詰まり始め、深さ 25cm でピークを迎えた後、緩み始めるも 30cm 以深では貫入式土壌硬度計が入らず、測定できなかったことを示しています。



図Ⅲ-3 麦作期間中の水田転換畑の測定結果

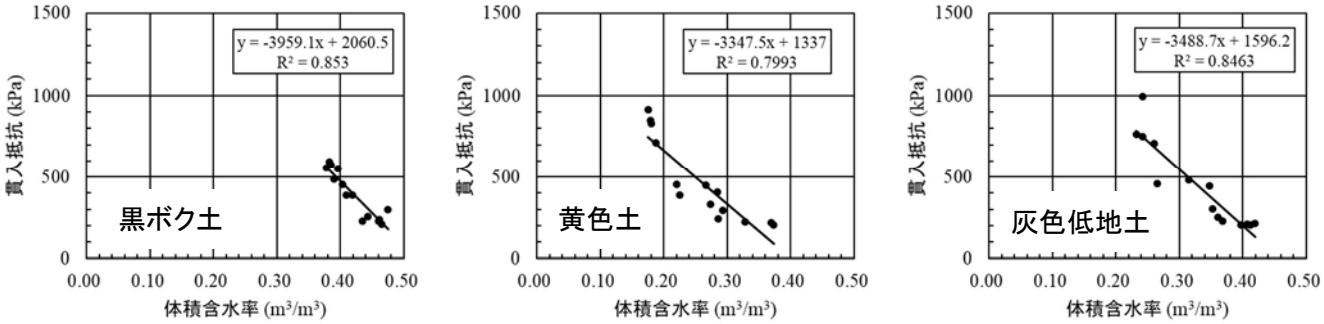
G 圃場を例にして、耕盤層の位置の特定法を示します。耕盤層の貫入抵抗は 1,500kPa 以上を示し、根が伸びにくくなるとされています。なお、貫入抵

抗が 2,000kPa を超えると、根がこれ以上伸びなくなるとされています。G 圃場の場合 16cm の深さで初めて 1,500kPa を超えていますので、耕盤層の上面は 16cm と言えます。その後、30cm 付近で 1,500kPa を下回っていますので、耕盤層の下面は 30cm と言えます。これらの結果から、G 圃場の場合、耕盤層は 16-30cm と特定することができます。また、耕盤層より浅い層（0-16cm）が作土層と見なすことができ、作土層厚は 16cm と特定できます。

(2) 貫入抵抗と土壌水分量

西日本農研内の検定土槽（コンクリート枠に同一の土壌を詰めたプールのようなもの）において、地下水位を変更させながら、貫入抵抗と深さ 5cm の土壌水分量（体積含水率）の関係を調べました。その結果、図Ⅲ-４に示すように、各土壌とも同一の土壌では、水分量が大きいほど、貫入抵抗値が小さくなるという相関が示されました。すなわち、土壌水分量の比較的少ない降雨前と比較的多い降雨後では、同じ地点でも、降雨後の方が低い値を示します（礫などに当たった場合は除きます。）ので、他の圃場と比較する場合等には、同じような土壌水分状態の時に測定する必要があります（○○mm 程度の降雨から△△日後のように、測定条件を決める。）

排水性の良い圃場では、表層の貫入抵抗値が速やかに降雨前の値に戻りやすいのに対して、排水性の悪い圃場ではなかなか戻りません。また、「２．応用編」で説明するように同一の圃場内で比較すると、貫入抵抗値を使って土壌水分量の高い深さや地点（地区）を推定することもできます。



図Ⅲ-4　土壌毎の貫入抵抗値と土壌水分量（体積含水率）の関係
（左から、黒ボク土、黄色土、灰色低地土）

1.4. 技術導入の手順

購入先：大起理化工業(https://www.daiki.co.jp/)

DIK-5532 デジタル貫入式土壌硬度計　一式　499,000 円(税別)

2. 応用編（圃場における土壌硬度の三次元分布）

2.1. 本技術のポイント

（1）圃場全面深さ 60cm までの三次元的な土壌硬度分布を把握できます

デジタル貫入式土壌硬度計(DIK-5532)は深さ 60cm まで 1cm 刻みで土壌硬度を測定できます。デジタル貫入式土壌硬度計を用いて圃場を万遍なく土壌硬度を測定すると、水平方向について深さ 1cm ごとに土壌硬度の硬軟に関する等高線図を描くことができます。土壌には水分含量が増加するとともに可塑性が高くなって軟らかくなる性質があり（1.3（2）貫入抵抗と土壌水分量　参照）、その性質を上手に使うと圃場内の大きな水みちや水が溜まりやすい場所を三次元的に推定することができます。本技術による診断結果を参考に、明渠や暗渠を施工すると圃場内の排水性が改善されます。

2.2. 作業手順

（1）準備するもの

・貫入式土壌硬度計（DIK-5532）：付属のデータ表示器は GPS のみ捕捉できるタイプ

・雑巾

・GNSS レシーバー（GPS だけでなく、GLONASS，QZSS（みちびき）なども捕捉できるタイプが望ましい）

表Ⅲ-1　GNSS レシーバーの例

みちびき対応製品リスト（https://qzss.go.jp/usage/products/list.html）

メーカー	製品名	対応信号
アウトドア・スポーツ		
ガーミン	[GPSMAP] GPSMAP 64csx / GPSMAP 66i / GPSMAP 64sc J [eTrex] eTrex 32x / eTrex 22x / eTrex Touch 35J / eTrex Touch 25J / eTrex 30xJ / eTrex 20xJ / eTrex 10J [Foretrex] Foretrex 601 [OREGON] OREGON 750TJ [Edge] Edge1030 Plus / Edge1030 / Edge830 / Edge530 / Edge130 Plus / Edge 25J	L1C/A （衛星測位サービス）
テクタイト	[ゴルフナビ] ShotNavi NEO2 HP	L1C/A（衛星測位サービス）・L1S（サブメータ級測位補強サービス）
パイオニア	SGX-CA600（GPSサイクルコンピューター）	L1C/A （衛星測位サービス）
フォレストシー	GeoChat（チャット＆SOSデバイス） / GeoBaseMulti（親機兼中継機） / GeoBase Single（中継機1ch）	
ポラール	M460	
モバイル アクション	GT-820 PRO	
ユピテル	AGN5500 / YG-Watch A / YG-Watch F / YGN6200 / YGN6100 / YGN5200 / YGN5100 / YGN5000 / YGN4800 [霧島レイモデル] Lei Watch	
	[ゴルフナビ] YGN7000	L1C/A（衛星測位サービス）、L1S（サブメータ級測位補強サービス）
Wahoo	エレメントローム（GPSサイクルコンピューター）	L1C/A （衛星測位サービス）

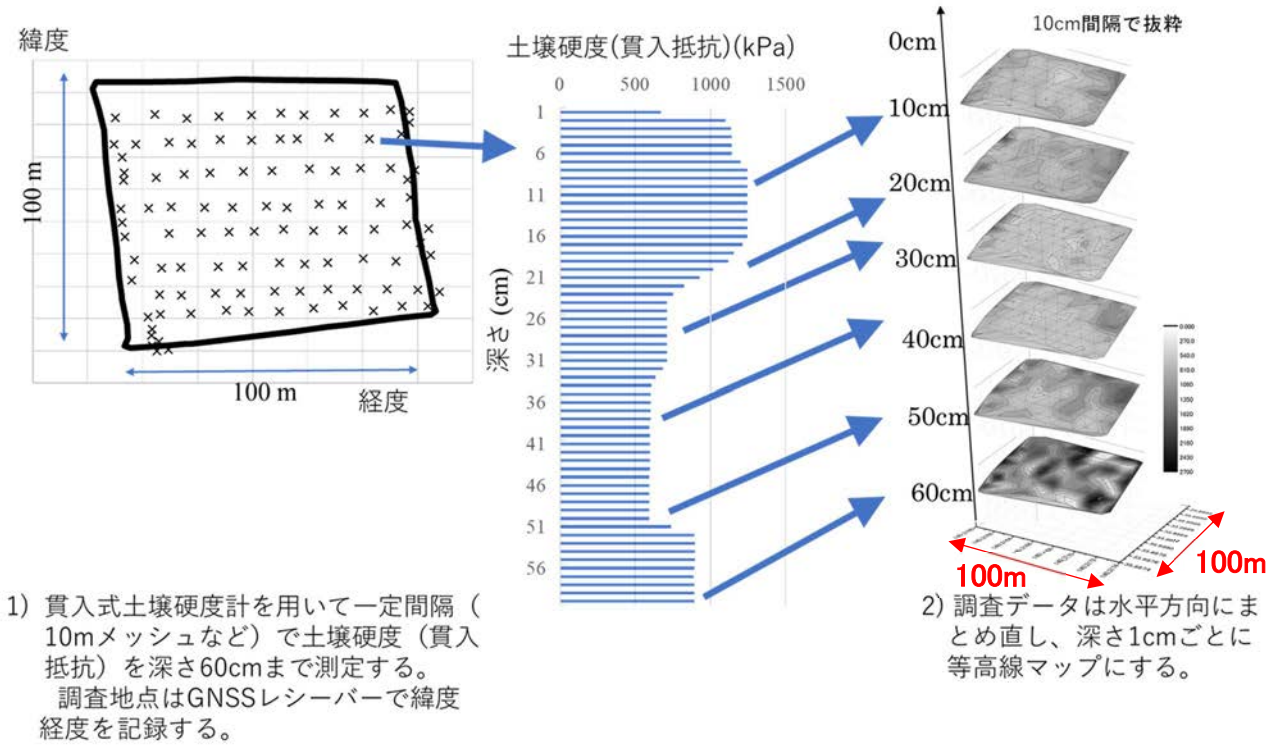
（２）測定前の準備

・貫入式土壌硬度計（DIK-5532）を組み立てます。スピンドルの長さは 60cm を用います。データ表示器の電源を入れて、しばらく放置した後、GPS 衛星を捕捉して位置情報を測定できているかを確認します。

・GNSS レシーバーの電源を入れ、しばらく放置した後、様々な衛星を捕捉できているか、特に QZSS（みちびき）を捕捉できているかを確認します。

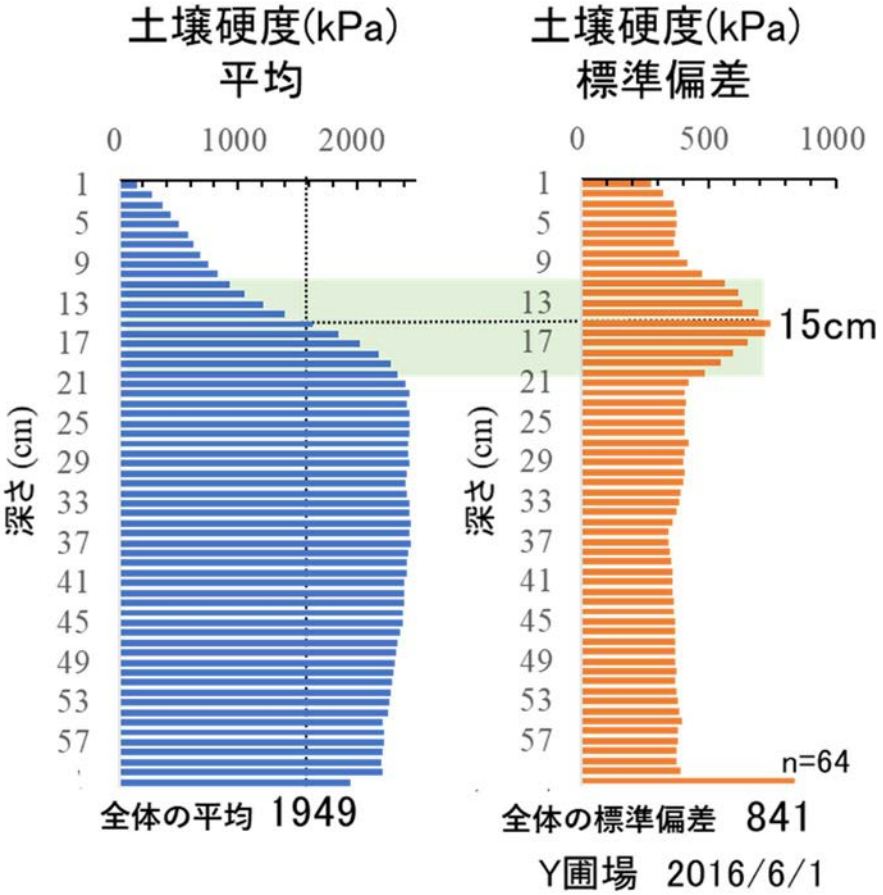
（３）測定手順

・GNSS レシーバーで位置情報を記録しながら、圃場を 10～15m メッシュでデジタル貫入式土壌硬度計を用いて土壌硬度を測定します。目安として、60～80 点/ha 程度です（図Ⅲ-5　1））。測定時間は 1.0～1.5 分/地点、1ha 圃場で 75～90 分程度です。



図Ⅲ-5　土壌硬度三次元分布図　構築手順

・調査終了後、データ表示器から測定データをコンピュータに移し、圃場単位でエクセルファイルにまとめます。GNSS レシーバーからも位置情報をコンピュータに移し、土壌硬度データをまとめたエクセルファイルに統合します。統合したエクセルファイルからデータをコピーし、解析用ソフトウェアのスプレッドシートに張り付けて、深さ 1cm ごとに土壌硬度等高線図を描かせます（図Ⅲ-5　2））。→多量の測定データをエクセルファイルにまとめる必要があるため、マクロプログラムを組んであります。それを用いると、データの抜き取りからエクセルファイルへまとめるまで 5 分もかかりません。また、特殊な解析用ソフトウェアを用いてバッチ処理するので、土壌硬度等高線図を 60 枚分描くまで 10 分程度です（解析時間合計 15 分程度/圃場）。

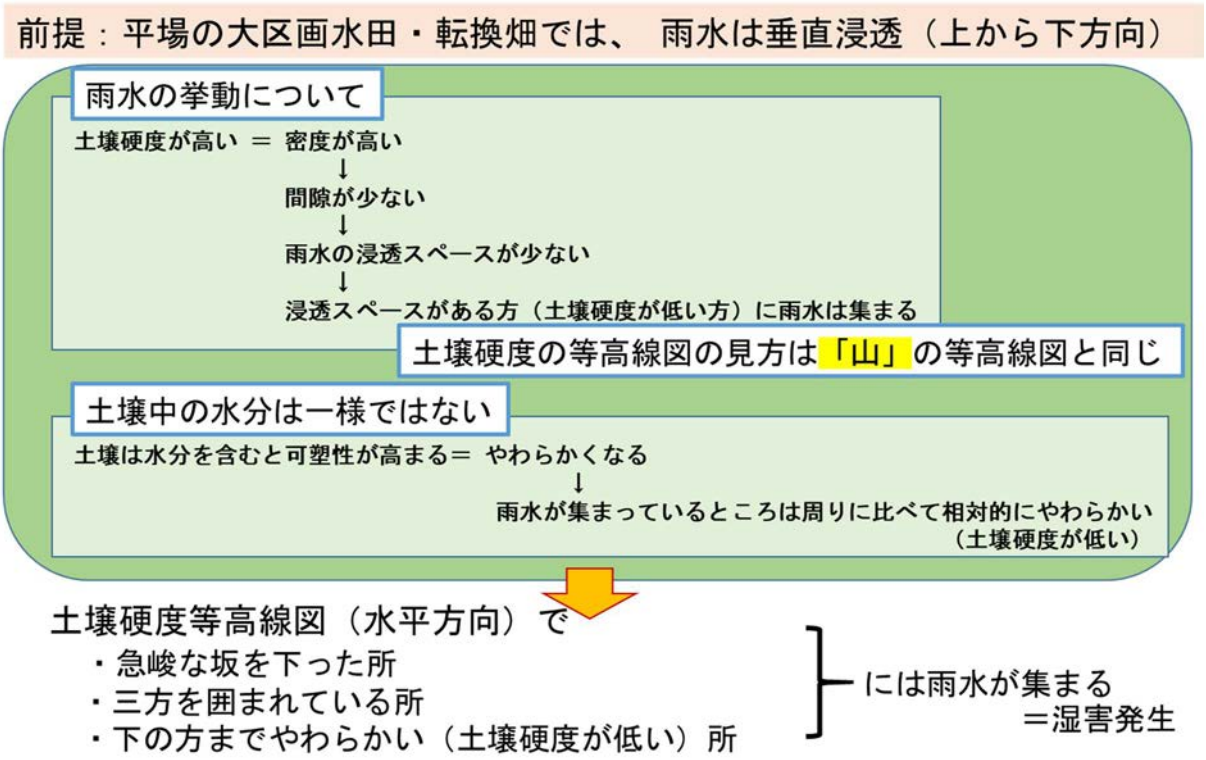


図Ⅲ-6　深さ 1cm ごとの土壌硬度の平均と標準偏差

この場合の耕盤層開始位置は 15cm と判定できる

・土壌硬度データを、深さ 1cm ごとに土壌硬度の平均と標準偏差をまとめると、標準偏差のグラフでピークがいくつか出てきます。一番大きなピークの頂点が耕盤層の始まりです（図Ⅲ-6）。耕盤層の位置は圃場内で均一では無く、場所によっては、深さの上下や厚みの変化があります。標準偏差の分布から圃場内の耕盤層の分布を把握することができます。

・土壌には可塑性があるので、深さ 1cm ごとの土壌硬度の硬軟分布を表層から深さ 60cm まで俯瞰し、水分を含んで柔らかくなっているエリアを特定することで、湿害・干ばつハザードマップとして利用できます。判定スキームは図Ⅲ-7 の通りです。

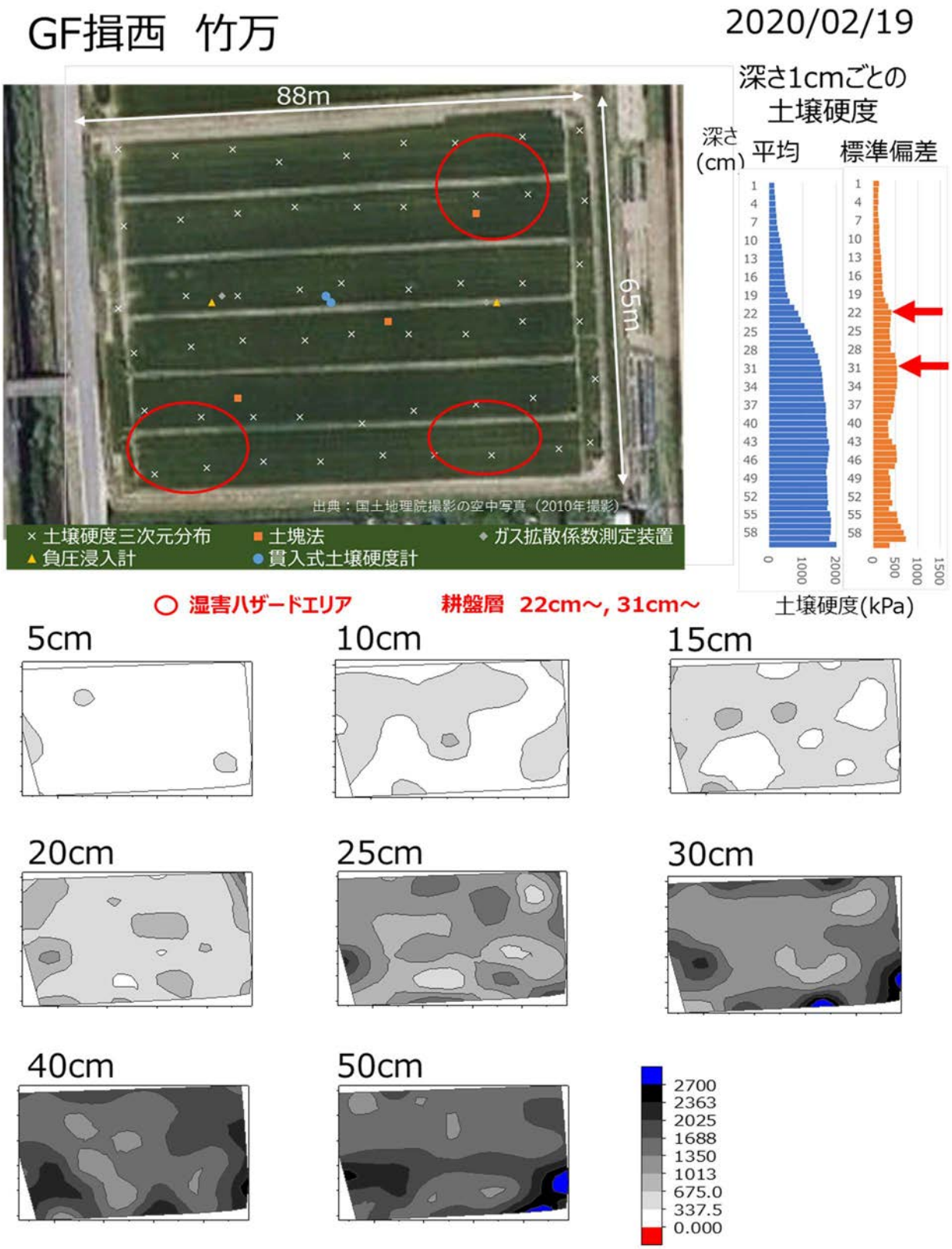


図Ⅲ-7 湿害ハザードマップとしての判定スキーム

（スキームを逆にすると干ばつハザードマップとして使用できる）

・具体例として、次ページの「現地調査例」について、〇エリア（湿害ハザードエリア）と深さごとの土壌硬度分布図と見比べて下さい。〇エリアで緑色が薄くなっていたり、草量が少なくて土壌表面が見えたりしているのが分かります。〇エリア（湿害ハザードエリア）の特定方法を詳しく知りたい方は、特許許諾の関係があるため、参考資料　下層土の物理性診断（P. 56）３から６をご覧いただくか、外部からの受付窓口（P. 57）にお問い合わせ下さい。

2.3. 現地調査例


GF揖西　竹万
2020/02/19
88m
65m
出典：国土地理院撮影の空中写真（2010年撮影）
× 土壌硬度三次元分布
■ 土塊法
◆ ガス拡散係数測定装置
▲ 負圧浸入計
● 貫入式土壌硬度計
深さ1cmごとの
土壌硬度
深さ
(cm)
平均
標準偏差
土壌硬度(kPa)
○ 湿害ハザードエリア
耕盤層　22cm～, 31cm～
5cm
10cm
15cm
20cm
25cm
30cm
40cm
50cm
2700
2363
2025
1688
1350
1013
675.0
337.5
0.000

Ⅳ．透水性の診断（畑の透水係数の測定）

１．　本技術のポイント

（1）従来法（飽和状態での測定）との違い

水田で畑作物が作られる場合、水田はもともと水を貯めやすいように作られているので、“水はけ”が問題となるケースが多く見られます。“水はけ”と関係が深い土壌の透水性については、これまでにもさまざまな方法で測定されてきています（表Ⅳ-1）。その多くは、強い雨の直後や田んぼに水を張った状態を再現するような間隙の中はすべて水で満たされた状態（飽和状態、p. 55 用語解説）での測定です。これは、その土壌の最大の透水能力を表しますが、畑の状態では、空気が入った間隙もある（不飽和状態、p. 55 用語解説）ために水の通り道は減り、透水性は小さくなります。このため、畑利用の時には不飽和状態での透水性をもとに“水はけ”を考える必要があります。しかし、このような測定は難しいために、測定事例は多くはありませんでした。ここで紹介する負圧浸入計は、現場で粗大間隙を除いた不飽和条件での土の透水性を測ることができる装置です（表Ⅳ-2）。

土が乾いていくとき、大きなサイズの間隙から水が抜けて空気の通り道になっていきます。土壌への酸素の供給を考えるとこれは好ましいことですが、土壌によっては急激に透水性が低下してしまい、土壌内部はいつまでも湿った状態になる場合があります。適切な営農管理を選択していくためには、大雨の直後だけ排水経路となる大きな間隙も含めた透水性と、雨のあともしばらく排水経路となる部分のみの透水性を分けて把握し、管理作業との関係を知ることが有効です。

表Ⅳ-1　透水性の測定方法

土壌の状態	測定場所	測定方法		対象
飽和/湛水	室内	飽和透水係数	定水頭	採取試料
			変水頭	
	オンサイト	シリンダーインテークレート		円筒を打ち込んだ箇所
		減水深	一筆	圃場全体
			N 型	枠を打ち込んだところ
			漏水量迅速測定器	枠を打ち込んだところ
不飽和	室内	不飽和透水係数		採取試料
	オンサイト	**負圧浸入計**		測定円盤直下
		土中水分分布モニタリングから解析		センサーとセンサーの間の層

表Ⅳ-2　負圧浸入計で測れるもの

		土壌全体の透水性	粗大間隙による透水性	粗大間隙以外の透水性	晴天が長期間続いたときの透水性	①測定場所 ②測定時間	備考
	負圧浸入計	○	○	○	×	①オンサイト ②1～3 時間程度	
従来法	シリンダーインテークレート(飽和)	○	×	×	×	〃	
従来法	採取試料による透水性試験(飽和)	○				①実験室 ②複数日	
従来法	採取試料による保水性試験(pF-水分曲線)	△	△	△	△	①実験室 ②週～月単位	間隙径分布から推定
	採取試料による透水性試験(不飽和)		○	○	○	〃	特別な装置

また、これまでの現地測定から、実施に際して表Ⅵ-3 のような特長も挙げられます。

表Ⅳ-3 負圧浸入計による現場測定の特長

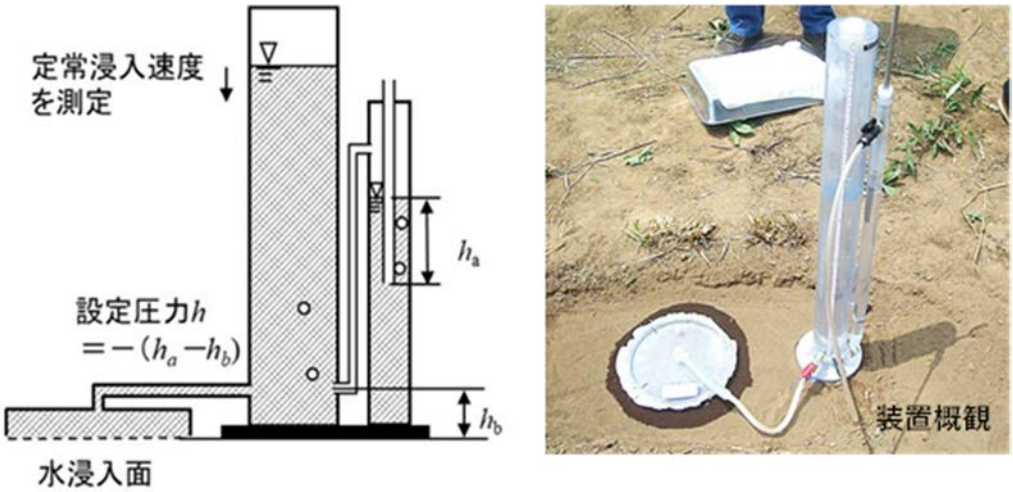
特長	現場での利点等
測定対象層を破壊しない	生産圃場での調査実施の許可を得やすい
測定中、土壌に水が浸入すると、給水部では気泡が上がることから、透水性を目で確認できる。	見学者（調査圃場所有者等）も実感しやすい
装置の設置に力を要しない	一人作業も可能
測定に使う水の量が少ない	現地での水の確保に悩まずに済む

（２）装置の概要

負圧浸入計は、1980 年代に開発されました。Tension Infiltrometer、Disk Permeameter などと呼ばれています。

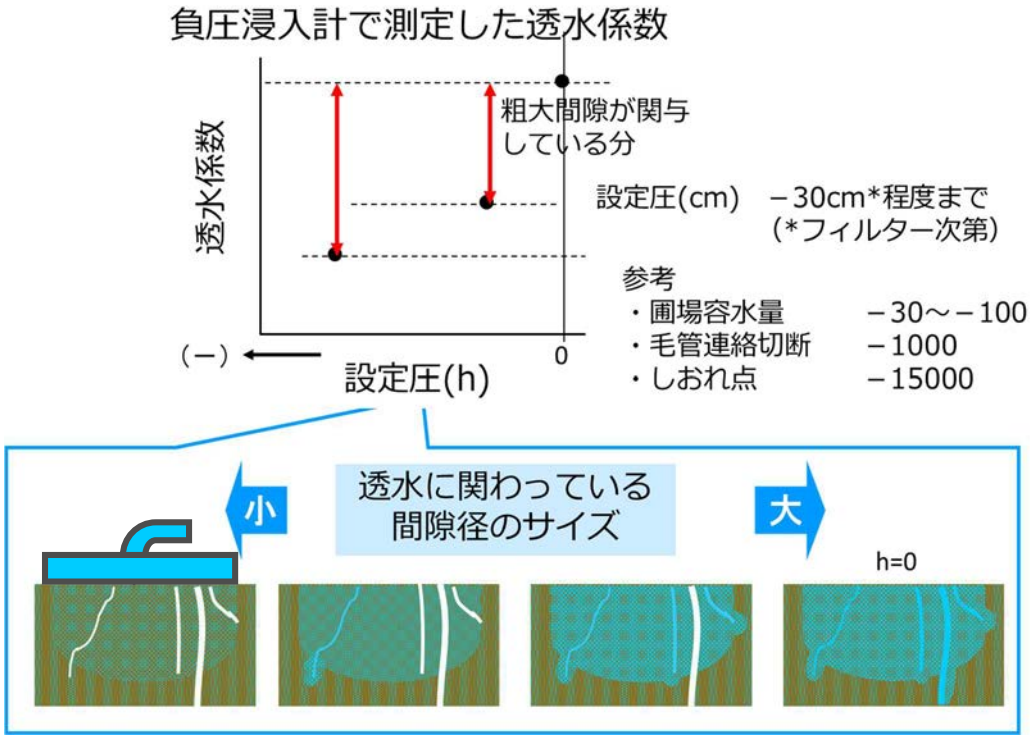
負圧浸入計は、給水タワーと水浸入面となるディスク、浸入する水の圧力を負圧に設定できる負圧調整部からできています（図Ⅳ-1）。聴診器のように、測りたい面にディスクをあてて測定し、着目する土層を乱さないのも特徴の一つです。生産者水田の耕盤など、破壊を避けたい場合にも測定が可能です。

給水タワーとディスクが一体となったタイプと、分離しているタイプがあります。一体型は、装置の設置面積が小さく、設置面の準備が楽ですが、水の浸入に従って装置自重により土壌構造が崩れる場合があります。分離型は、その逆です。



図Ⅳ-1　負圧浸入計（分離型）の模式図と外観

設定圧を変えることで、図Ⅳ-2 のイラストのように水が浸み込まない粗大間隙径をコントロールできます。数段階設けて測定した場合には図Ⅳ-2 のグラフのようになり、透水性の変化から粗大間隙の寄与がどの程度であったかがわかります（図Ⅳ-2 では設定圧 0（飽和）との差を赤矢印で例示）。



図Ⅳ-2　負圧浸入計結果の見方

2． 作業手順

（1）必要な道具

・負圧浸入計

・水準器

・へら（土壌面を平らにするもの）

・篩または豊浦砂

・ストップウォッチ

・水

・たらい

（2）設定負圧の検討

どの圧力に設定するかは、測定する人が決めます。

複数の設定圧を設けて各設定圧での透水係数を算出する方法と、複数の異なる直径のディスクで測定し、設定圧での透水係数を算出する方法があります。

ディスクの用意等を考えると、複数の設定圧を設ける場合の方が費用が安く済むので、この方法に絞って検討しました。水田耕盤の場合、根の伸長による下層改良の場合にはそれぞれ表Ⅳ-4 のような測定条件を提案します。（農研機構、2016-2020 年測定事例をもとに作成）

表Ⅳ-４　設定圧の提案

	設定圧（h）	測定数
水田耕盤	0~-15 cm	２～３段階
根の伸長による下層改良	0～-20 cm	２～３段階

特に、下層改良効果を期待した緑肥や最近注目されている水田での子実トウモロコシ作付けの効果（根の伸長によって下層に粗間隙を増やし、また、乾燥を進める）を見る場合、取り組み初期には、設定圧の小さい方（絶対値で大きい）に未改良の場合との差が出る傾向にあります。根の腐朽程度で差がでる設定圧が変わると思われます。

測定実施前にすでに飽和に近いような状態である場合は、設定圧の小さい方の測定がうまくいかないことがあります。降雨の翌日などの測定は避ける方が無難です。

（３）測定手順

(1) 負圧浸入計の準備

負圧浸入計に水を入れます（図Ⅳ-3）。このとき、ディスクから給水タワーに至る経路に気泡が残らないようにします。負圧調整部は、給水タワーとつながるチューブの中は空気である必要があります。水が咬まないように注意します。

図Ⅳ-3　負圧浸入計に水を入れた様子

(2) 接地面の準備

負圧浸入計を設置する面をへらなどで平らにします（図Ⅳ-4）。

水準器等で傾きがないことを確認します（図Ⅳ-5）。分離型の場合、ディスクを置くところと給水タワーを置くところの水平も確認します。

図Ⅳ-4　接地面を整えている様子（水田耕盤の例）

図Ⅳ-5　ディスク設置部の水平確認の様子

図Ⅳ-6　ディスク設置面の仕上げ

ディスクと測定面が密着するように、設置箇所に砂や現地の土（篩で振るったもの）を敷き（図Ⅳ-6 左図）、長い物差しなどで平らにします（図Ⅳ-6 右図）。

(3) 測定

- 負圧調整部で負圧を設定

一体型の場合、設定負圧＝圧力調整筒を水中に差し込んだ長さ（図

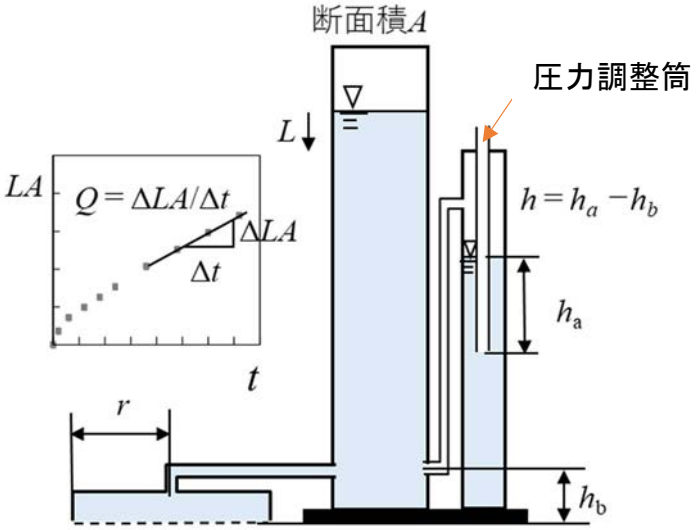
Ⅳ-7 中の h_a）

分離型の場合、

設定負圧＝圧力調節筒を水中に差し込んだ長さ(h_a)―設置面から給水タワーとディスク接続位置の高さ（h_b）

- 給水タワーの初期水面位置を記録
- ディスク―給水タワー―負圧調整部の経路中にある栓を開き、一定時間経過ごとに給水タワーの水面位置を記録（図Ⅳ-7 中のグラフが書けるように。L, t を記録）。
- 水面低下速度が安定して同じ値（定常）になったら（図Ⅳ-7 中の Q が求められる）、給水タワー―負圧調整部にある栓を閉じ、次の圧力に設定を変えます。透水性が低い時には測定に時間がかかります。例えば、栓を開いて 10 分経過しても設定圧に到達しない（圧力調整筒の下端まで水面が下がらない）なら次の圧力に設定を変える、などの“測定不能”の判断を決めておくとよいでしょう。

- 設定した圧力で測定を繰り返します。



図Ⅳ-7　分離型の圧力 *h* の設定

測定中のチェックポイント

- 圧力調整筒の先端から気泡が出たときが設定圧に到達したときです。設定圧が小さい場合ほど調整筒を差し込む長さは長くなり、調製筒内部の余計な水が多くなります。土があまり乾いていないときや透水性が小さいときには、測定開始までにかかる時間が長くなります。
- 給水タワーと負圧調整部で気泡の出る様子が大きく異なる場合は、正常な測定状態にありません。経路のどこかに異常（多くの場合空気漏れ）がないか確認する必要があります。
- 設定圧をどこまで小さくできるかは、ディスクのフィルターの性能次第です。ディスク部に気泡が入ってくるようなら、その設定圧での測定は実施できません。

(4) 計算

複数の設定圧で簡便に透水係数を計算する場合には、Ankeny et al.（1991）の式を使います。下に最終的な計算部分を示します。詳細は、原著をご覧ください。

$$Q(h_1) / (\pi r^2 + 4r/\alpha) = K(h_1)$$

$$Q(h_2) / (\pi r^2 + 4r/\alpha) = K(h_2)$$

$$\alpha = \ln(Q(h_1)/Q(h_2)) / (h_1 - h_2)$$

Q ：定常状態での浸入速度 （$L^3 T^{-1}$）
r ：ディスクの給水面半径 （L）
$K(h)$ ：設定ポテンシャルhにおける透水係数 （$L T^{-1}$）
α ：土壌に応じて設定されるパラメータ（L^{-1}）

設定圧を 3 段階以上（例えば、h_1,h_2,h_3）にすると、$K(h_2)$は(h_1,h_2)を用いて計算した場合と（h_2,h_3）を用いて計算した場合の 2 つの値がでるので、平均します。

3． 現地調査の概要

稲・麦・大豆を作る生産者圃場で調査を行った例を紹介します。排水性が問題となる事例があることから、雨水が土中に浸入して、最初に移動制限が加わると想定される耕盤を測定対象としました。

個々の測定値は示しませんが、h=0 では、10^{-4}～10^{-3} オーダーの透水係数（cm/s）であり、土地改良事業計画設計基準及び運用・解説（計画「ほ場整備（水田）」）に示されている値 “最小透水土層の透水係数が 1×10^{-4} ～ 1×10^{-5} cm/s が望ましい” よりやや大きい値でした。ただし、多くの圃場は、わずかな負圧で測定限界以下となったことから、”粗大間隙の中でも大きなサイズの間隙“と”小さな間隙“の二

極化した間隙構成であることが分かりました。このような圃場では、大雨のあと、地表面の湛水は比較的早く消えます（大きな間隙を伝って排水）が、その後の排水は、ゆっくりになることが想像できます。他方、荒代掻きなど、入水時には、はじめ順調に土が濡れていくように見えますが、耕盤あたりが十分に濡れると大きな間隙での排水が始まり、湛水面はなかなかできないということが想像されます。代掻きが完了し、耕盤より上に難透水層が作られると、水はたまります。中くらいの間隙は、畑利用を進めて下層に根が伸長することで増えていきます。サブソイラ等で下層を膨軟にし、根の伸長を促すとよいでしょう。耕盤を破砕したくない場合には、下層から排水される水をなるべく減らすように明渠を活用し、表面排水を促すことで圃場の乾燥を進めます。

４．　技術の導入手順

（１）　負圧浸入計の入手について

・エンドウ理化（受注生産）

・大起理化（Soil Measurement Systems 社製、T1-20-SS（給水タワー＋直径 20cm ディスク）。本 SOP 中で紹介した写真はこちらの製品）

など。

（２）　負圧浸入計測定の参考書

・Mark D. Ankeny et.al 1991 Simple Field Method for Determining Unsaturated Hydraulic Conductivity Soil Sci. Soc. Am. J. 55:467-470 https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2136/sssaj1991.03615995005500020028x

・宮崎毅　2015　土壌への雨水浸透　東銀座出版社

・日本土壌肥料科学会監修　2003　土壌標準分析・測定法　博友社（複数のディスクを使う場合）

Ⅴ．通気性の診断（ガス拡散係数の測定）

１．　本技術のポイント

（1）現場に近い条件で圃場のガス移動特性が測定できます

作物の湿害の主な原因は土壌中の酸素濃度不足です。例えば、土壌の相対ガス拡散係数（p．52 用語解説）が 0.02 を下回ると、根の伸長が抑制されます。湿害が多発する日本では土壌物理性の改善の目安としてガス拡散係数を把握することは重要です。

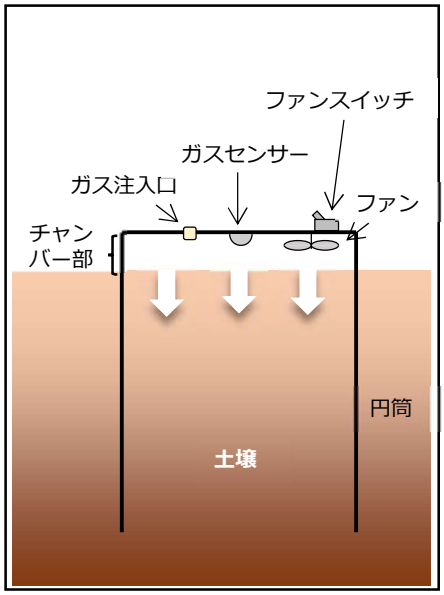
そこで農研機構では、実際の圃場（オンサイト）において、地表から土壌の深部に移動するガスの拡散係数を簡易に測定する装置を開発しました（図Ⅴ-１）。ガス拡散係数測定装置は、大起理化工業（https://www.daiki.co.jp/）から販売されています。

図Ⅴ-１　ガス拡散係数測定装置を設置した様子

（２）測定の概要と原理

測定のあらましは以下のとおりです（図Ⅴ-2）。上部にガスセンサーがついたチャンバーを土壌に挿入します。次に、トレーサーガス（イソブタンガス）を添加し、土壌中への拡散によるガ

ス濃度の減衰速度を記録します。この手法では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利用し、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しています。測定後、固相の体積および体積水分率を測定します。最後にMicrosoft Excel のソルバー機能を使って、トレーサーガスの減衰速度からガス拡散係数を計算します。



図Ｖ-２　ガス拡散係数測定装置の模式図

理解を助けるため、実際の装置を簡略化して図示した。市販機はログ機能を有し、ファンのスイッチとロガーは別のボックス内に備え付けられている。

２．　具体的な作業手順

(1) 準備するもの

・ガス拡散係数測定装置（図Ｖ-１）

（大起理化工業 DIK-0465）

・ガスタイトシリンジ（図 V-3 a）：0.5 mL 容または 0.1 mL 容）

（使用実績があるものはハミルトンガスタイトシリンジ横穴針タイプ。シリンジのニードル部は長く、気をつけて挿入しないと土壌まで達してしまうので、ストッパーを作成し、「図 V-3 b）」に示すようにニードルの先端部にかぶせる良い）

・ストップウォッチ（図Ｖ-3 c））

・ものさし（図Ｖ-3 d））

・（必要に応じて）霧吹き（図Ｖ-3 e））

（大起理化工業 HP「検土器平」から引用）

図Ｖ-3　測定に必要な道具

a)ガスタイトシリンジと自作のストッパー、b)ストッパーを装着した写真、c)ストップウォッチ、d)ものさし、e)霧吹き、f) 土壌採取用の袋、g) スコップ、h) アルミバッグ、i) イソブタンガス、j) 移植ごて

・土壌採取用の袋（図Ｖ-3 f））

・スコップ（図Ｖ-3 g））

・アルミバッグ（図 V-3 h））

（使用実績があるものは、アルミニウムバッグ 3008-26101 に、交換用 M6 コネクター 3008-39997 と M6 コネクター用パッキン 3008-35105 をつけたタイプ。番号はすべてジーエルサイエンスの型番）。

・イソブタンガス（図Ｖ-3 i））

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。

（使用実績があるものはユニフレームプレミアムガス）

・移植ごて（図Ｖ-3 j））

こての部分の形状が平らなもの（例えば大起理化工業 DIK-1676「検土器 平」）が使いやすい。

（２）測定前の準備

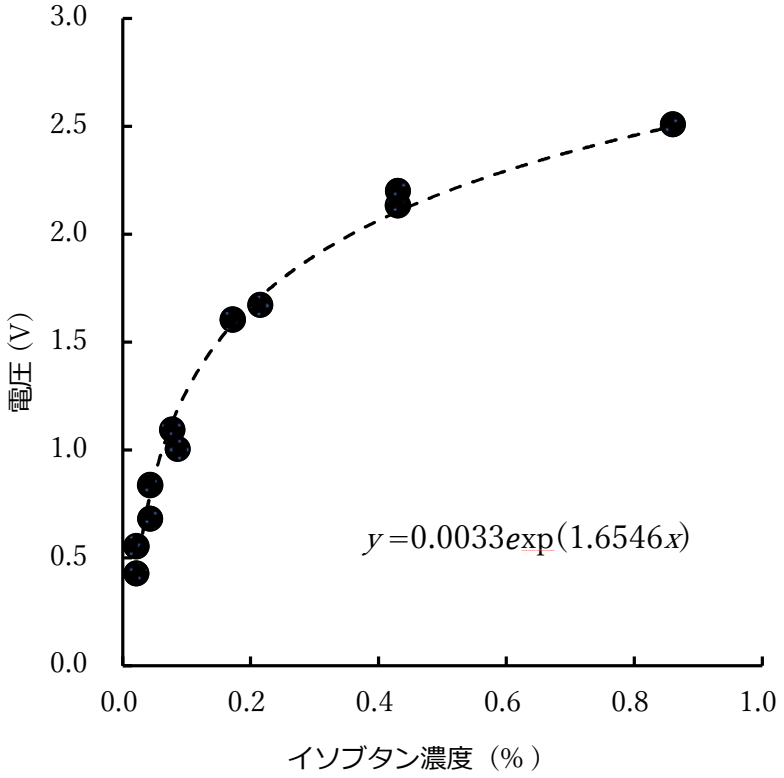
・センサーの出力調整

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、センサー基盤のオレンジ色の調節ネジを回し、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。

・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、安定後の出力電圧を記録します。この作業を様々な添加量で 4 回程度行います。次にガス拡散係数測定装置の microSD 内にある「検量線作成シート.xlsx」の青字の部分に得られた値を入力し、ソル

バー機能（p．50 注１）で検量線のパラメータａ、ｂを計算します。検量線は濃度に対し、指数で表現されます（図Ｖ-4）。検量線の作成は屋内で行っても構いません。また、検量線は一度作成すれば繰り返し使えますが、センサーの感度は徐々に上がっていきますので、使用頻度に応じて時々検量線を更新する必要があります。



図Ｖ-4　検量線の作成例

センサーの出力値とイソブタンガス濃度の関係は指数関数で表現できます。

・プレヒート

測定前には測定装置をコンセントに接続し、12 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。測定中は内蔵する電池でセンサー部を通電し続けます。測定終了時まで装置の電源はオフにしないでください。

(3) 測定手順

・イソブタンガスをアルミバッグに取り分けます（図Ｖ-5a）。

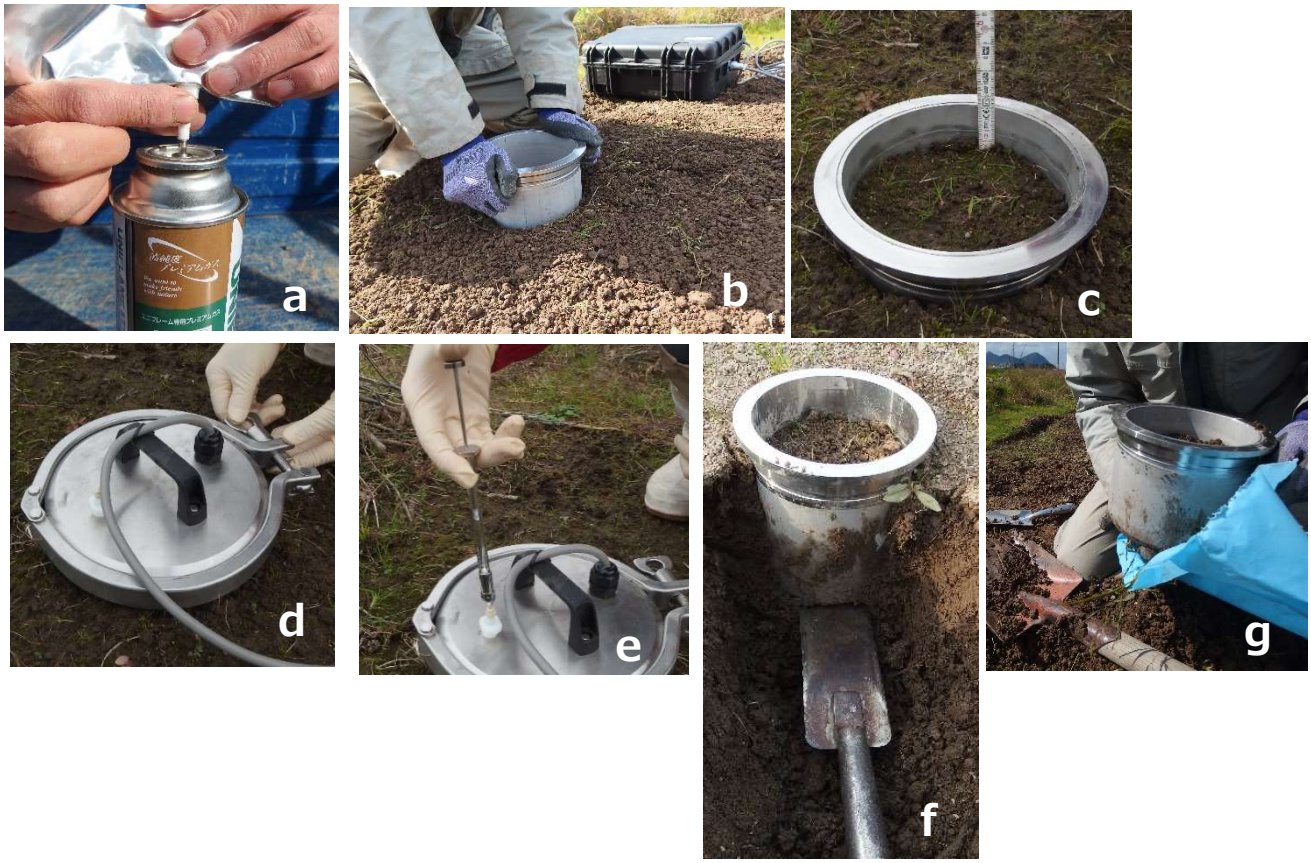
・上部 2.5 cm 程度が露出するように円筒を土壌に挿入し（図Ⅴ-5b）、「円筒上部の高さ」を計測しておきます（図Ⅴ-5c）。下層土を測定する場合は、作土を剥ぎ、下層土を表面に出してから上の作業を行います。

・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（p. 50 注２）。円筒内側の土壌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（p. 50 注 3）。

・蓋を被せ、ファンを回転させ 10 分程度静置し（p. 50 注 4）、表示部の読み値からチャンバー内の湿度が平衡したことを確認します（図Ⅴ-5d）。明確な増加や減少の傾向が無ければ平衡です。その後、ガスタイトシリンジを使ってアルミバッグから 0.05～0.1 mL のイソブタンガスをとり、円筒に添加（図Ⅴ-5e、p. 50 注 5）、本体のスイッチを押して、１分のインターバルで記録を開始します。添加後、約 10 秒後にファンのスイッチを切ります。

・土壌の状態にも依りますが、計測時間は 30～60 分が目安です。

・計測後、蓋をはずし、穴を掘り、円筒内の土壌をなるべく正確に回収します（図Ⅴ-5f および g、p. 51 注６）。回収した土壌は持ち帰り、「円筒内の生土重」と「円筒内の乾土重（105℃の乾燥重）」を求めます。



図Ｖ-５　実際の測定手順

a ボンベからアルミバッグへのガスの取り分け、b 円筒を土壌に挿入、c 土壌表面から円筒上端までの高さを測定、d 蓋を固定、e ガスタイトシリンジでイソブタンガスを注入、f 測定後円筒内の土壌を回収、g 袋で持ち帰り、乾土率を測定。

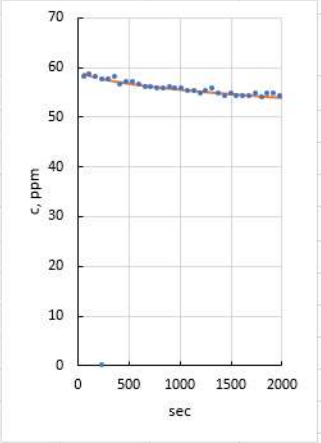
(4) 計算手順

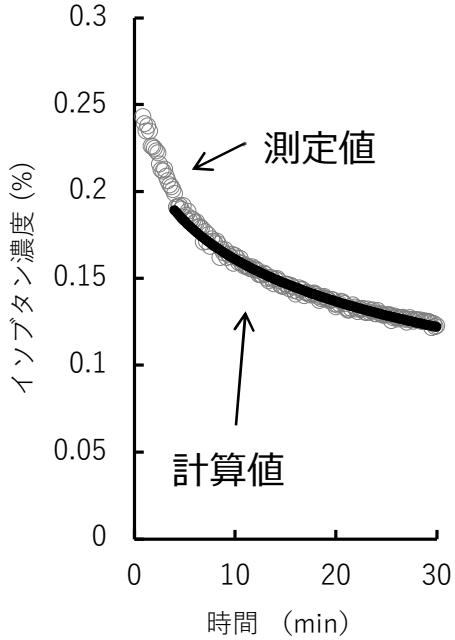
・計算には測定装置の microSD に同梱されている Excel の計算シート「計算シート v3.xlsx」を利用します。ファイルを開き、ファイル中の説明に従い青字の部分に測定で得られた数字を入力します（図 V-6 上図）。「真比重（p. 54 用語解説）」は通常、デフォルト値の 2.65g cm^3 を使います。最後にソルバー（p. 50 注１）を用いて相対ガス拡散係数 D/D_0 を計算します（図Ｖ-6 左図、p. 51 注 7）。

青字の個所を入力→平方和の範囲を再設定→「データ：ソルバー：解決」

項目		値	単位
拡散容器内の初期濃度	c_0	59.904	ppm
土壌の気相割合	p	0.25	
円筒内の生土重		1000	g
円筒内の乾土重		800	g
真比重		2.65	g/cm^3
円筒上部の高さ		2.83	cm
拡散容器本体の体積		542	cm^3
円筒部の体積		1994	
拡散容器の体積割る断面積	V	2.77	cm
拡散係数	D	0.0001364	cm^2/sec
相対拡散係数	D/D_0	0.0014149	
平方和		4	
濃度 $= a \times 10^{b電圧}$			
a		6.261	
b		0.001539	

時間	電圧	ゼロ点を引く	濃度	tau	計算値	平方和
sec	mV	mV	ppm		ppm	
0	1102			0.0000		
60	2548	1446	58.0	0.0003	58.8	0.7
120	2554	1452	58.5	0.0005	58.4	0.0
180	2548	1446	58.0	0.0008	58.0	0.0
240		-1102				
240	2543	1441	57.5	0.0011	57.7	0.0
300	2543	1441	57.5	0.0013	57.5	0.0
360	2548	1446	58.0	0.0016	57.3	0.5
420	2532	1430	56.6	0.0019	57.1	0.3
480	2538	1436	57.1	0.0022	56.9	0.0
540	2538	1436	57.1	0.0024	56.7	0.1
600	2532	1430	56.6	0.0027	56.6	0.0
660	2527	1425	56.1	0.0030	56.4	0.1
720	2527	1425	56.1	0.0032	56.2	0.0
780	2522	1420	55.7	0.0035	56.1	0.2
840	2522	1420	55.7	0.0038	56.0	0.1
900	2527	1425	56.1	0.0040	55.8	0.1
960	2522	1420	55.7	0.0043	55.7	0.0
1020	2522	1420	55.7	0.0046	55.6	0.0
1080	2516	1414	55.2	0.0048	55.5	0.1
1140	2516	1414	55.2	0.0051	55.4	0.0





図Ⅴ-６　ガス拡散係数の計算シート（上図）と測定例（左図）

左は計算に使用する「計算シート v3.xlsx」のシートの外観。右の測定例では気相率 p は 0.24、相対ガス拡散係数 D/D_0 は 0.086 と計算された。

３．　現地調査の概要

15 圃場 21 回の測定結果から、多くの水田転換畑の下層土ではガス拡散係数が小さく、根の伸長の閾値である D/D_0=0.02 を下回ることが分かりました。一方、作土ではガス

拡散係数は問題となりにくいと考えられました。下層土でガス拡散係数が小さい土壌を改良し、根の伸長を旺盛にするためにはプラウ耕等の深耕が有効です。

４．　注釈

（注１）ソルバー機能が Excel で見つからない場合は、オプションのアドインからソルバーアドインをアクティブにします。

（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）境界部分を埋めるのはトレーサーガスの通り道となってしまうことを避けるためです。通常はこの影響はほとんど無いですが、円筒の打ち込みがうまくいかなかった場合は問題となります。土壌の状態によって境界部分の埋め方は変わりますが、原則として円筒内全体への影響は最小限となるように、境界部分の部分のみを埋めます。外の土を持ってきても円筒内の土を練ってもどちらでも構いません。

（注４）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。例えば日差しが強い日には測定中の装置に日よけを作る等の工夫が必要です。

（注 5）シリンジにはガスタイトシリンジを使います。シリンジのニードル部分をアルミバッグ内で２～３回動かして、均一なガスをとり、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 6）円筒内の気相率を測る必要があるため、この時円筒内の土壌はなるべく正確に回収します。円筒下端より深めに円筒を掘り上げ、円筒の底の土が平らになるように（円筒内の土壌を正確に回収できるように）整形します。この作業は正確な値を得るための最も重要なポイントです。

（注 7）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。Excel シートは対応済みです。

５． 技術の導入手順

購入先：大起理化工業（https://www.daiki.co.jp/）

希望小売価格：460,000 円（税別）

用語解説（五十音順）

ガス拡散：土壌のガス交換は主に対流と拡散によって生じます。対流は外気と土壌中のガスの微小な圧力差が原因で生じる現象です。一方、拡散は、特定の成分の濃度差が原因で生じる現象です。土壌酸素のガス交換は主に拡散が主因だと考えられています。対流が生じるためには土壌と外気の気温差があったり、風が吹いていることが重要です。また、土壌中の気相の屈曲率の影響を大きく受けます。これに対し、拡散は根による酸素の消費が駆動力となり、屈曲率の影響をあまり受けません。植物の生育に必要な酸素のうち対流によって土壌中に運ばれるものは全体の 10%程度だと見積もられています（Lal and Shukla, 2004: Principles of soil physics, pp569-571, Marcel Dekker Inc., New York）。

下層土：一般に作土あるいは表土の下部にある土壌です。日本は降水量が多いので、下層土の排水性が作物生育に大きな影響を与えます。

乾燥密度：土壌の単位体積当たりの土壌固相の質量です。仮比重とも言います。実際には 100 cm^3 の採土円筒で現地の土壌を採取して 105℃で乾燥した後に重量を測定して計算します。土粒子密度（真比重）と異なり、気相を含む単位土壌体積当たりの固相密度です。

耕盤：耕うんした層の直下の土層は上の層とは異なる物理的性質を持ち，根の伸長や排水性に大きな影響を与える層です。「硬盤」、「すき床」などとも呼ばれており、それぞれの呼称

は厳密に定義されていない部分がありました。高橋ら（2021）は人為の影響、硬さ、透水性の３つの因子を元に、これらの呼称を厳密に分けることを提案しています。この提案に従うと、以下のような整理ができます。

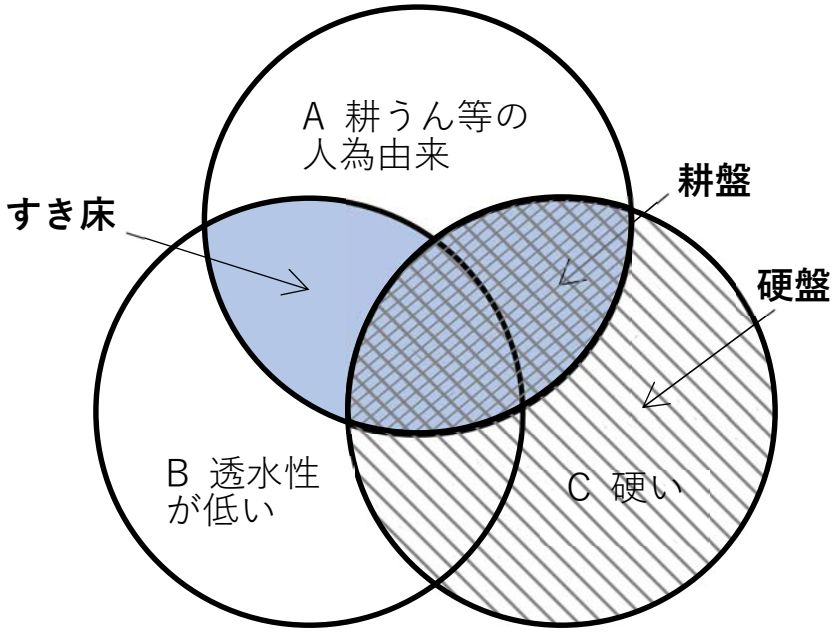


図　硬度、透水性および生成条件からみた耕うんした層の直下に現れる物理性の異なる層の分類

【硬盤】直上・直下の層に比べて硬度が大きい土壌断面の層位．人為によるものと自然生成物を含む（図における C）

【耕盤】作土直下に生成し、根の伸長や排水性に大きな影響を与える層のうち、人為の影響で生成した硬盤（図における A∩C）

【すき床】作土直下に生成し、根の伸長や排水性に大きな影響を与える層のうち、人為の影響で生成した土層（図における A∩B と A∩C）

（参考文献：　高橋智紀ら（2020）土壌調査から土壌物理性を診断する際の用語の整理―水田および水田転換畑を対象に―，土肥誌, 91(6), 464-466）

硬盤：「耕盤」の項目を参照。

作土：表土と呼ぶこともあります。土壌の表層にあり、均一に作物栽培を行うために耕耘によって常に攪拌されており、土壌硬度は低く、土壌生成に由来する構造を持ちません。近年、大型農業機械の普及により、作土が浅層化する傾向があり、作物の根張りに支障を生じ、土壌の排水性や保水性など土壌物理性の改善が必要となってきています。

真比重：土壌の固体部分を構成する成分の単位体積当たりの質量のこと。「土粒子密度」ともいいます。乾燥密度と異なり、気相を含まない土粒子のみの密度です。

すき床：「耕盤」の項目を参照。

粗間隙（孔隙）率：土壌の単位体積当たりの粗間隙の体積です。土壌の間隙は、30～100μm 付近を境にして細間隙と粗間隙に分けられます。粗間隙は毛管作用による水分保持がなく排水性や通気性に寄与する間隙です。

透水性：水の流れやすさ。一般的に透水係数を用いて定量化します。例えば飽和状態における透水係数 K（m s^{-1}）は以下の式で表現されます。

$$q = -K\frac{dH}{dx}$$

ここで q は単位時間中に土壌中を流れる水の体積（$m^3\ m^{-2}\ s^{-1}=m\ s^{-1}$）、$H$ は水頭（水の持つエネルギーを水柱の高さに置き換えたもの。この場合では水位差）、x は流れと同じ向きの２点間の距離です。

土壌構造：土壌構造は、「土粒子と間隙が形成する幾何学的構造」です。土粒子は、そのサイズから粘土、シルト、砂に分類されます。これらに有機物が加わり粒子が結合して集合体（団粒）が形成され、その結果様々な間隙が生じることになります。圃場の排水性や保水性などに関わるので、その状態を把握することは土壌管理上で重要です。土性がそれぞれの土壌に固有であるのに対して、土壌構造は耕起などの土壌管理を受けて変化します。土壌構造を測定する方法は様々ですが、土壌固相部分の状態を調べる方法と間隙の状態を調べる方法に分けられます。前者は、断面調査、団粒分析、土塊分析、乾燥密度など、後者は、水分保持曲線とそれに関連する水分恒数などです。
（参考文献：「新編　土壌物理用語事典」、土壌物理学会編（養賢堂、2002）、Soil structure as an indicator of soil functions: A review、Rabot et al. 2018、Geoderma 314: 122-137.）

不飽和状態：土壌中の間隙に空気と水が混在している状態です。畑は基本的に不飽和状態と考えることができます。

飽和状態：土壌中の間隙がすべて水で満たされた状態です。

参考資料

○土壌構造の診断

1．成果情報：土塊分析による土壌物理性の簡易評価（農研機構　研究成果情報 2021 年）

2．岡ら（2021）土塊分析による土壌物理特性の簡易評価の試み 土肥誌 92 200-206.

3．「土塊分析による土壌物理性簡易評価マニュアル」 農研機構 北海道農業研究センター（2021 年４月公開予定）

○下層土の物理性診断

1．成果情報：土壌物理性簡易診断として圃場全面深さ 60cm までの土壌硬度を三次元分布で評価する（農研機構　研究成果情報 2018 年）

2．成果情報：農業機械による作業前後で簡易土壌物理性診断を行うと作業効果を定量化できる（農研機構　研究成果情報 2018 年）

3．Ebato (2020) Evaluation of Soil Hardness in Paddy Fields by Cone Penetrometer as a Simple Soil Physical Diagnosis Method, Agricultural Information Research 29 (1), 24–39.

4．江波戸 (2021) デジタル貫入式土壌硬度計を用いた土壌物理性簡易診断方法, 作物生産と土づくり 2020 年 12 月・2021 年 1 月号 Vol.53(1) No.560, 71-76.

5．特許：圃場における土壌物理性診断方法（特開 2019-020395）

6．特許：土壌硬度等高線マップを用いた農作業機の運行支援方法（特願 2020-031461）

○透水性の診断

1. Mark D. Ankeny et.al 1991 Simple Field Method for Determining Unsaturated Hydraulic Conductivity Soil Sci. Soc. Am. J. 55: 467-470 https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2136/sssaj1991.03615995005500020028x

2. 宮崎毅　2015　土壌への雨水浸透　東銀座出版社
3. 日本土壌肥料科学会監修　2003　土壌標準分析・測定法　博友社（複数のディスクを使う場合）

○通気性の診断

１．「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-」https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/080230.html（2018 年 3 月 16 日）
２．成果情報：圃場で土壌のガス拡散係数を簡易に測定できるガス拡散係数測定装置（農研機構　普及成果情報　2021 年）
３．髙橋ら（2021）原位置で土壌のガス拡散係数を簡易に測定できるガス拡散係数測定装置、土肥誌、92(1)、11-18.

担当窓口、連絡先

外部からの受付窓口：
農研機構　中日本農業研究センター　地域戦略部　研究推進室　広報チーム
029-838-8481（代表）　koho-carc@ml.affrc.go.jp

農研機構

NARO 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

「農研機構」は、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構のコミュニケーションネーム（通称）です。