

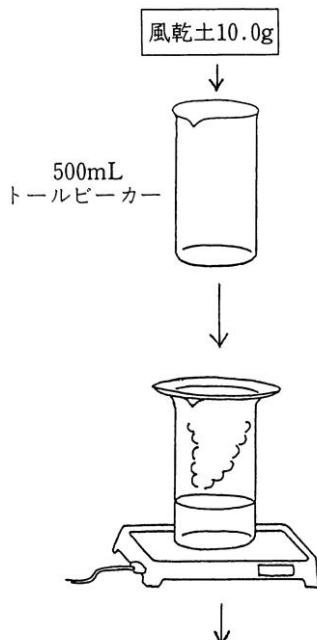
Ⅲ 土壤物理性

1. 室内測定

1. 1 粒径組成（国際法、農学会法；ピペット法による）

1) 操作

(1) 有機物の分解



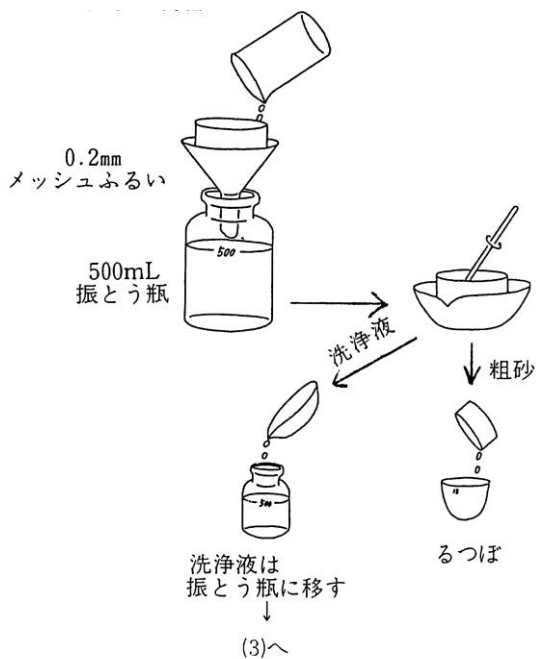
①風乾土10.0gを500mLトールビーカーに取り、脱塩水約50mLを加える。
30%過酸化水素を約5～10mL加える。

②時計皿でふたをし、30～60分間静置する。

③分解反応が起きて白煙が生じてきたら（反応が激しい場合はある程度収まってから）、湯浴上または約80℃に熱したホットプレート上で加熱・分解する。有機物が多い場合は発泡が激しいので注意する（発泡が激しい場合はアルコールを少量加えると収まる）。

④発泡が収まり、液が澄んできたら分解終了。分解不十分と思われる時は、一旦放冷後、過酸化水素をさらに5～10mL加え再び加熱する。激しい反応終了後、少なくとも2時間加熱して反応を終了させ、過剰の過酸化水素を追い出す。冷却後、上澄液を注意して除去する。一般に分解終了時は土色が褐色～灰白色となり、上澄液がやや緑がかった見えるが、土の種類によっては分解の終了が判然としないものもある（過酸化水素の添加から分解終了までは2～5時間ほどかかる）。

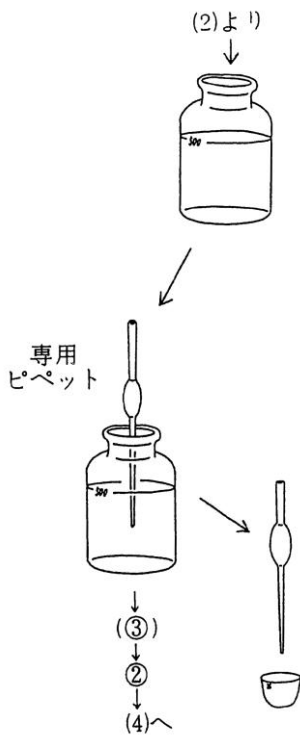
(2) 粗砂の分離



①500mL振とうビンの上に0.2mmのメッシュふるいを重ねたステンレスロートをのせ、有機物分解の終了した試料をふるい上に洗い流す。トールビーカーの内壁に付着した試料は、先端にゴム管を付けたガラス棒などでこすり落とし、脱塩水でふるい上に洗い流す（この時、加熱した脱塩水を用いると迅速に洗い流すことができる）。

②ふるい上の粗砂の表面に粘土が付着しているので、蒸発皿に適量の脱塩水を入れ、その中でふるいごと洗浄する。蒸発皿の脱塩水は振とうビンに移し、粗砂がきれいになるまで洗浄を繰り返すが、振とうビン内の液量が450mLを超えないよう注意する。洗浄した粗砂はるつぼに移し、105℃で乾燥後、精秤する。→A (g) とする。

(3) シルト、粘土の採取



① シルト（+粘土）の採取（国際法）

粘土の分散剤としてヘキサメタリン酸ナトリウム溶液25mLを加え、ゴム栓をして2時間振とう後、脱塩水で500mLに定容する（ゴム栓に付着した試料も洗い入れる）。

振とうビンを実験台に並べ、液温を測定し、下表のシルトの欄を参考にして静置時間を確認する（例、25℃で2分08秒）。手で1分間激しく上下に振とう後、実験台に静置し、以降の時間をストップウォッチで測定する。

所定の時間に液面から5cmの深さまでピペットを差し入れ（この時ピペットの口はふさいでおく）、10mLの懸濁液を10秒間で吸引し、重量既知のるつぼに移す。ピペットの外壁に付着した懸濁液は拭き取り、さらに脱塩水を吸引して、ピペット内壁に付着した試料をるつぼに入れ、105℃で乾燥後、精秤する。→B（g）とする。

② 粘土（国際法）の採取

シルト（+粘土）採取後の液を、そのまま水を加えずに再度1分間激しく振とう後、①と同様の操作を行い、粘土（国際法）を採取する（例、25℃で3時間33分）。→C（g）とする。なお、③で述べる農学会法による粘土採取を同時に行う場合は、③の操作を行った後の懸濁液について②の操作を行う。

③ 粘土（農学会法）の採取

採取時間を変えて①と同様の操作を行い、粘土（農学会法）を採取する（例、25℃で8分31秒）。→D（g）とする。

※〔操作の順序〕

国際法のみ：(3) ①→②→(4)

農学会法のみ：(3) ③

両法を同時に行う場合：(3) ①→③→②→(4)

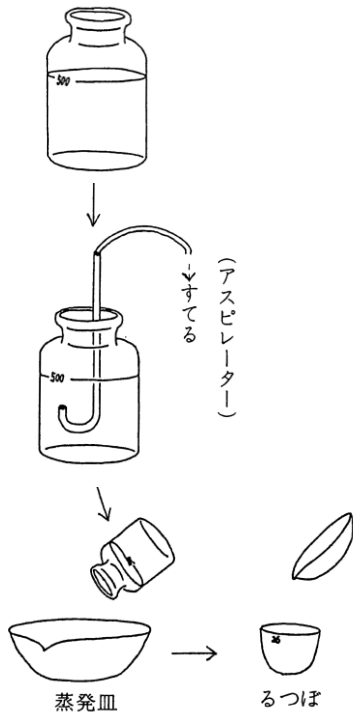
④ヘキサメタリン酸ナトリウムの重量確認のための空試験

振とうビンにヘキサメタリン酸ナトリウム溶液を25mL入れ、試料と同様に定容、振とうし、3個のるつぼに10mLずつ採取して、乾燥し精秤する。その平均重をヘキサメタリン酸ナトリウム重とする。通常は22～23mg前後である。→K（g）とする。

表1 シルトおよび粘土の採取時間（深さ5cm）

温度 (°C)	国際法		農学会法
	0.02-0.002mm シルト	0.002mm以下 粘土	0.01mm以下 粘土
10 °C	3分 7秒	5時間 12分	12分 28秒
11	3 2	5 3	12 7
12	2 57	4 55	11 47
13	2 52	4 47	11 29
14	2 48	4 40	11 11
15	2 43	4 33	10 54
16	2 39	4 26	10 37
17	2 35	4 19	10 21
18	2 31	4 12	10 5
19	2 27	4 6	9 51
20	2 24	4 0	9 36
21	2 21	3 54	9 22
22	2 17	3 49	9 9
23	2 14	3 43	8 56
24	2 11	3 38	8 43
25	2 8	3 33	8 31
26	2 5	3 28	8 20
27	2 2	3 24	8 8
28	1 59	3 19	7 57
29	1 56	3 15	7 47
30	1 54	3 11	7 37

(4) 細砂の採取（農学会法ではこの操作は不要）



①シルトと粘土を採取後、脱塩水で500mLに定容する。振とうビンの液温を測定し、前表のシルトの欄より静置時間を確認する（例、25℃で2分08秒）。

②振とうビンを激しく振とうし、静置以降の時間をストップウォッチで測定する（粘土採取の時ほどは厳密に行う必要はなく、かくはん棒で激しくかき回す程度でよい）。

③所定の時間に液面から5cmの深さに吸引管の口を差し入れ、その深さまでの懸濁液をサイホンを利用して吸引除去する。再度定容、かくはんし、同様の操作を深さ5cmまでの上澄液がほぼ透明になるまで5～10回程度繰り返す。

（水道にアスピレーターを接続し、その先端に図のような吸引管をつけて懸濁液を吸引除去する方法は、やや精度に欠けるが非常に便利であり、実用上問題はない。）

④細砂が沈み、液が澄んだら、細砂を蒸発皿に移し、余分な上清は捨て、るつぼに移して105℃で乾燥後、精秤する。→E (g) とする。

2) 計算

(1) 国際法

①精秤した値 (g) を供試試料 (10.0g) 当りに換算する。

粗砂 (g) : A

細砂 (g) : E

シルト (g) : $\{ (B-K) - (C-K) \} \times 50 = (B-C) \times 50$

粘土 (g) : $(C-K) \times 50$

②粗砂+細砂+シルト+粘土=T (g) とすると (Tは無機物合計量)、

粗砂 (%) = $\text{粗砂} / T \times 100$

細砂 (%) = $\text{細砂} / T \times 100$

シルト (%) = $\text{シルト} / T \times 100$

粘土 (%) = $\text{粘土} / T \times 100$

③各面分の組成割合から、31ページ表2に基づき国際法による土性を判定する。

なお、 $T (g) \times 10 + \text{風乾土水分} (\%) + \text{腐植含量} (\%) = 100 \pm 2$ 、程度であれば分析の精度は高いが、 100 ± 5 程度でも実用上十分である。

注) 国際法の原法では、乾土に対する粗砂、細砂、シルト、粘土の各割合 (%) で粒径組成を表示するのが正式な表示法であるが、日本では一般に粒径組成と言え、土性区分の際に用いられる相対的存在割合 (%) で表わすのが普通である。

(2) 日本農学会法

M=試料重(10.0g)とすると、

$$\text{粘土含量 (\%)} = (D-K) / 10 \times 500 / M \times 100 = (D-K) \times 500$$

粘土含量 12.4% 以下 → S (砂土)

〃 12.5~24.9% → SL (砂壤土)

〃 25.0~37.4% → L (壤土)

〃 37.5~49.9% → CL (埴壤土)

〃 50.0%以上 → C (埴土)

(農学会法は風乾細土試料に対する粘土含量%で表す)

3) 使用する器具、試薬

(1) 500mLトルビーカー、500mL振とうビン(標線付き)、時計皿、るつぼ、蒸発皿、0.2mmメッシュふるい(ステンレス)とロート、三方コック付き10mLピペット、温度計、ストップウォッチ、吸引管(サイホンまたはアスピレーターと接続)、振とう機、駒込ピペット、ガラス棒、スパチュラ

(2) ヘキサメタリン酸ナトリウム溶液(ヘキサメタリン酸ナトリウム40.8gを水1Lに溶かす)、過酸化水素(30%)

4) 補足説明

(1) 粘土含量(農学会法) > 粘土含量(国際法) あるいは、粘土(農学会法) < {粘土(国際法) + シルト} とならない場合は実験精度が低いので、再分析を行う。

(2) ただし、泥炭土などの有機物含量の多い土壌では、粘土含量(農学会法) < 粘土含量(国際法) となる場合もある。これは、国際法は無機物合計量に対する粘土含量で表示するのに対し、農学会法は有機物をも含めた供試土壌に対する粘土含量で表示するためである。

(3) 粘土の分散剤として、通常はヘキサメタリン酸ナトリウム溶液を使用するが、1N水酸化ナトリウムや1N塩酸などが用いられることもある。一般にアロフェン質黒ボク土では1N塩酸の方が分散しやすい。また、分散剤添加の前に、超音波による機械的破碎を行う方法もあるが(例えばローム質の黒ボク土に対して)、その場合は、一般に触感による判定に比べ、より細粒質の土性と判定されることが多い。

(4) 国際法の原法では、各粒径区分(粗砂、細砂、シルト、粘土)および腐植(有機物)、炭酸塩等の無機化合物の合計値を100として表示し、土性区分をする際にのみ、三角座標を用い、無機物合計値(粗砂、細砂、シルト、粘土の含量)を100とした各粒径区分の相対的な存在割合で示すことになっている。しかし、日本では、慣行的に土性区分の際に用いる各粒径区分の相対割合(%)を粒径組成(%)として表示しているため、本書もこれにならった。

(5) 国際法と言っても実際に世界共通の方法となっているわけではない。事実上の世界共通の標準的方法としてはアメリカのUSDA法があり、アメリカやFAOの土壌分類で用いられている。

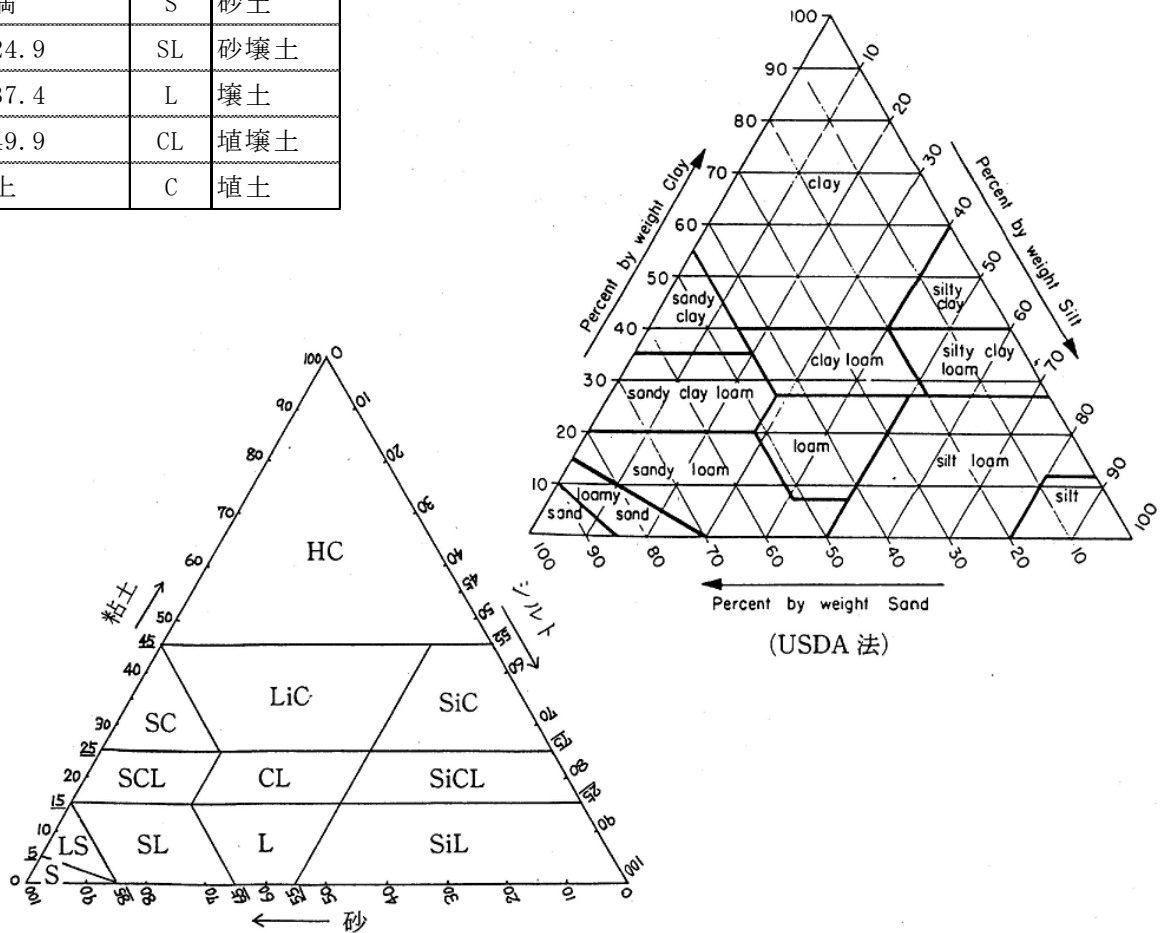
表2 土性の判定

(国際法)

キアアウトによる土性の判定		土性	粒径組成による定義		
判定順	条件 (数値は%。「～」は以上、未満)		粘土%	シルト%	砂%
①	粘土 45以上	HC 重埴土	45 ~ 100	0 ~ 55	0 ~ 55
②	粘土 25~45 &シルト 45以上	SiC シルト質埴土	25 ~ 45	45 ~ 75	0 ~ 30
③	” &砂 55以上	SC 砂質埴土	25 ~ 45	0 ~ 20	55 ~ 75
④	” &SiC、SC以外	LiC 軽埴土	25 ~ 45	0 ~ 45	10 ~ 55
⑤	粘土 15~25 &シルト 45以上	SiCL シルト質埴壤土	15 ~ 25	45 ~ 85	0 ~ 40
⑥	” &シルト 20~45	CL 埴壤土	15 ~ 25	20 ~ 45	30 ~ 65
⑦	” &SiCL、CL以外	SCL 砂質埴壤土	15 ~ 25	0 ~ 20	55 ~ 85
⑧	粘土 15未満 &シルト 45以上	SiL シルト質壤土	0 ~ 15	45 ~ 100	0 ~ 55
⑨	” &砂 65~85	SL 砂壤土	0 ~ 15	0 ~ 35	65 ~ 85
⑩	” &砂 40~65 かつ シルト 20~45	L 壤土	0 ~ 15	20 ~ 45	40 ~ 65
⑪	砂 85以上 &粘土 < (7.5-0.5 (100-砂))	S 砂土	0 ~ 5	0 ~ 15	85 ~ 100
⑫	” &粘土 ≥ (7.5-0.5 (100-砂))	LS 壤質砂土	0 ~ 15	0 ~ 15	85 ~ 95

(農学会法)

農学会法粘土%	土性
12.4未満	S 砂土
12.5~24.9	SL 砂壤土
25.0~37.4	L 壤土
37.5~49.9	CL 埴壤土
50.0以上	C 埴土



(国際法)

図1 粒径組成による土性の位置付け

(対数目盛)	0.0001	0.0005	0.001	0.01	0.01	0.05	0.1	0.5	1.0	5	10 (mm)				
日本 農学会法	粘土			シルト		細砂		粗砂		礫					
国際法	粘土			シルト		細砂		粗砂		礫					
米国 (USDA)	粘土			シルト		極細砂	細砂	中砂	粗砂	極粗砂	礫				
ドイツ (DIN)	細	中	粗	細	中	粗	細	中	粗	細	中	粗	石		
フランス	細	中	粗	細	粗	細	粗			礫					
イギリス (BSI)	粘土			細	中	粗	細	中	粗	礫					
(旧)ソ連 (カチンスキー法)	コロイド	細	粗	細	中	粗	細	中	粗	礫	3.0				
日本統一 土質分類 (土質工学会)	コロイド		粘土	シルト		0.07	細	粗	2.0	細	中	粗	礫	岩石	
碎屑性堆積物 (地質学会)	粘土			1/256	1/64	1/16	1/8	1/4	1/2	1.0	2.0	4	64	256	
				シルト		極細粒		細粒	中粒	粗粒	極粗粒	細	中	大	巨
火山放出物 (地質学会)							1/4		4		32				
							細粒火山灰		粗粒火山灰		火山礫		火山岩塊		

注)ドイツ: 土壌物理学概論(K.H.HARTGE著、福士訳)より

フランス: コンサイス土壌学(ph.デュショール著、永塚訳)

(旧)ソ連: 土壌地理学の基礎・上

(I.P.ゲラーシモフ、M.A.グラーツフスカヤ著、菅野・原田訳)より

米国、イギリス: Introduction to Soil Physics (D.HILLEL著)より

USDA: 米国農務省

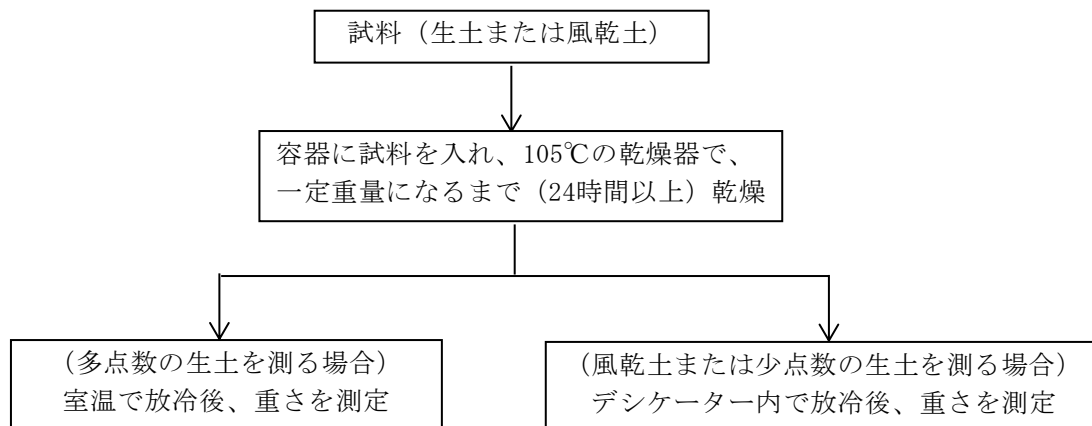
DIN : ドイツ標準規格

BSI : 英国標準研究所

図2 各国、各分野における粒径区分(粒度区分)

1. 2 含水比、水分率、体積含水率

1) 操作



2) 計算

容器重をA (g)、乾燥前の(容器+試料)重をB (g) 乾燥後の(容器+試料)重をC (g) とすると、
含水比 (%) = 水分/乾土重 × 100 = (生土重 - 乾土重) / 乾土重 × 100 = (B - C) / (C - A) × 100
水分率 (%) = 水分/生土重 × 100 = (生土重 - 乾土重) / 生土重 × 100 = (B - C) / (B - A) × 100
体積含水率 (%) = 水分の体積/土壌の体積 × 100 (※採土管での水分測定で用いられることが多い)
乾土係数 = 生土重/乾土重 (※生土での化学性分析値を乾土換算する場合などに用いられる)

なお、各表示法の間には以下の関係がある。

$$\text{含水比} = \{ \text{水分率} / (100 - \text{水分率}) \} \times 100$$

$$\text{体積含水率} = \text{含水比} \times \text{乾燥密度} \quad (\text{※乾燥密度: 単位体積当たりの固相の質量。単位: g/cm}^3)$$

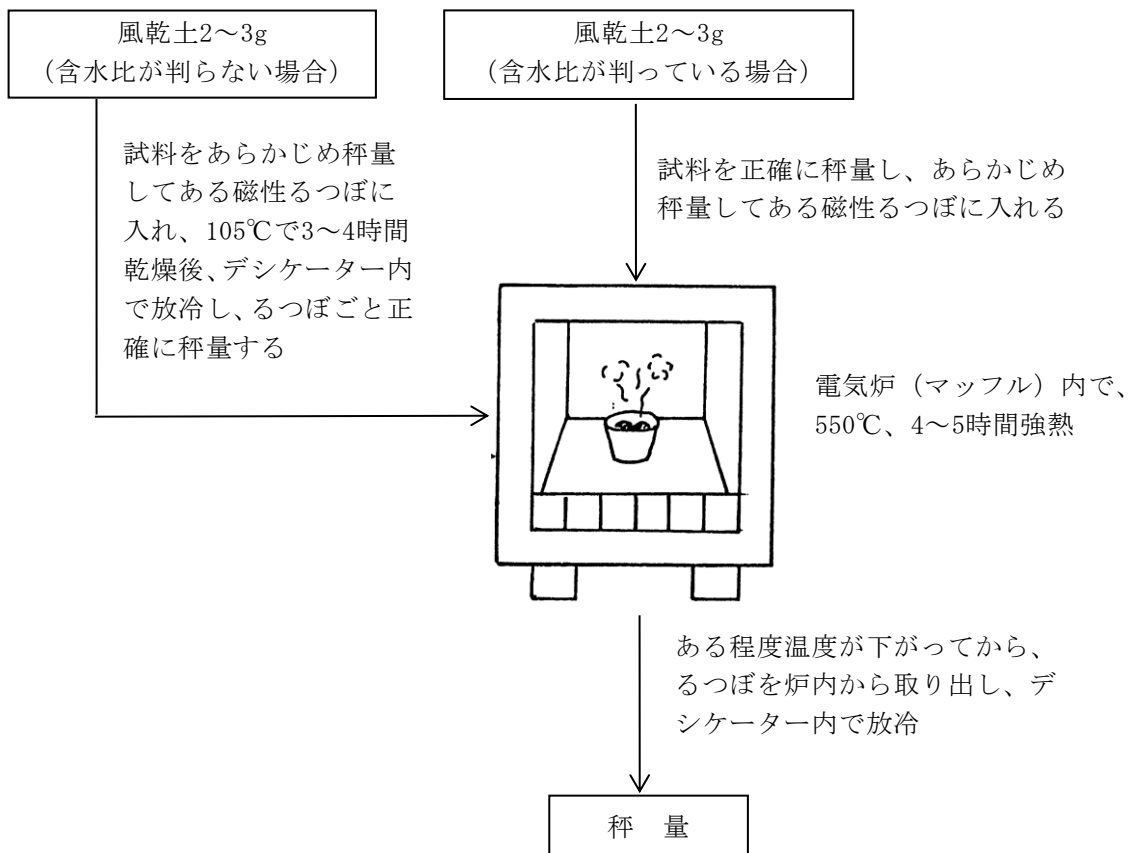
$$\text{乾土係数} = (100 + \text{含水比}) / 100$$

3) 補足説明

- (1) 容器は何でも良いが、精密測定には磁製のつぼやアルミ秤量管が使われる。その場合は、容器自体も1~2時間乾燥後、デシケーターに入れ、正確に秤量しておくこと。多量の生土の場合は市販のアルミ皿(料理用)を使うと良い。
- (2) 一般に、化学分析の場合に用いられる「水分」とは上記の水分率のことである。一方、物理性の分野(農業土木、土質工学)では含水比を使うのが一般的である。
- (3) 土壌の保水量などを水柱や面積当たりで表示する場合には体積含水率が有効である。体積含水率は上記のように、含水比あるいは水分率と乾燥密度から換算できる。

1. 3 強熱減量（灼熱損量、灼熱損失）

1) 操作



2) 計算

試料重（乾土として）をA（g）、るつぼ重をB（g）、強熱後の（試料＋るつぼ）重をC（g）とすると、
強熱減量（%）＝ {（A＋B）－C} / A × 100

3) 補足説明

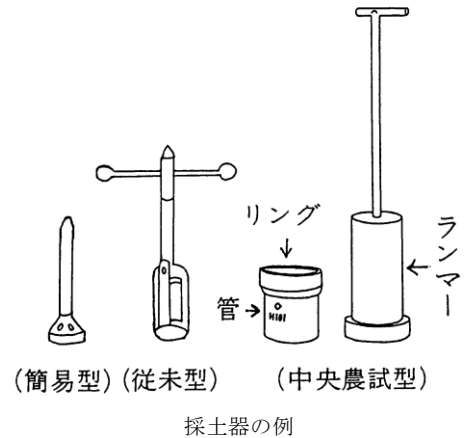
- (1) 北海道の土壤診断基準では、草地の“土砂含量”を測るときにこの分析を行う。すなわち、100から強熱減量を差し引いたものが“土砂含量”となる。また、泥炭土壤ではしばしばこの分析を行う。
- (2) 強熱温度は、土壤肥料分野では550～600℃、農業土木（土質工学）分野では700～800℃とされている。

1. 4 100mL採土管試料の採取法および各項目の測定フロー

1) 操作

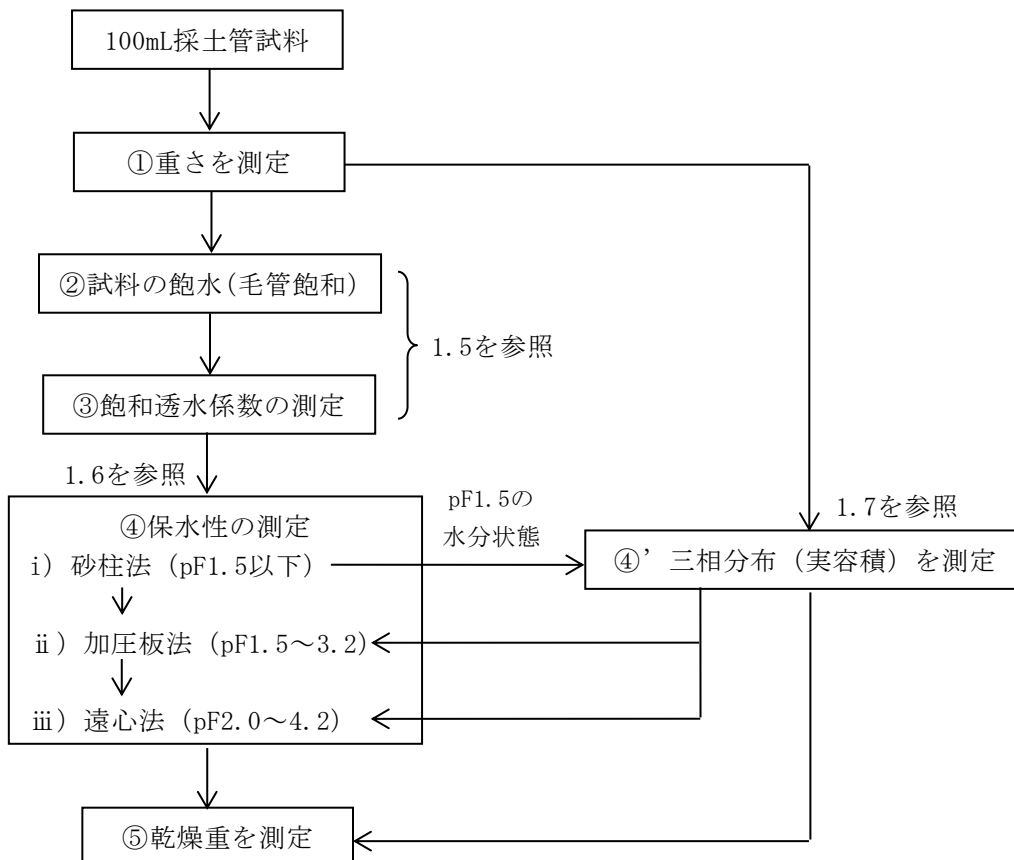
(1) 採取法

100mL採土管による試料の採取には採土器を用いる。採土器にはいくつかの種類があるが、簡易型や従来型よりも、中央農試型の汎用性が高い。静かに押し込むのが原則だが、硬い場合は強くたたき込む必要がある。採土管本体側面の数字に上下方向を合わせて採土する習慣をつけておくと良い。採土後は両面の余分な土をナイフで平らに削り取る。その際、粘質な土壌では、孔隙を塗り込めないように注意する。管外面に付着した土をふき取ってから、ふたをし、ビニールテープで巻いて密閉する。少なくとも3連で採取することが望ましい。



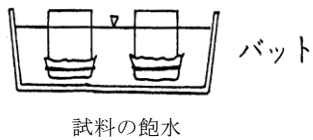
(2) 測定フロー

各項目の測定フローは下図の通りである。測定項目は必要に応じて取捨選択し、不要な項目は省略して、次の項目の操作に進む。



1. 5 飽和透水係数（変水位法）

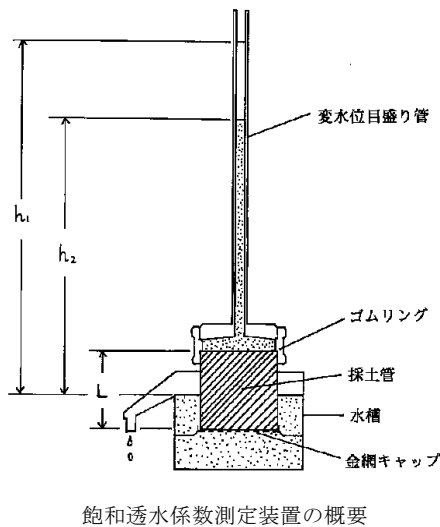
1) 操作



(1) 試料の飽水

採土管の底面にろ紙（例えばNo. 3、11cm）をあてて輪ゴムでしっかりと止め、ほぼ管の高さまで水を満たしたバット内に1～2日間静置して飽水させる。

透水係数のみを測定する場合は、飽水の際、土の両面をナイフ等で軽くはがして、なるべく自然の構造面を露出させる（土の量が若干減っても影響はほとんどない）。また、土と管内壁との間に隙間がある時は、飽水後にワセリンで（またはその部分の土をこすりつけて）埋める。



(2) 測定

採土管上部にゴムリングと変水位目盛り管を接続し、水を満たした水槽に試料をセットする（ろ紙は付けたままでも良い）。

ゴムリング内に気泡が残らないように変水位目盛り管を水で満たし、目盛り管内の水面が上部線から下部線まで下降するのに要する時間 t (s) を測定する。その際、採土管、ゴムリング、変水位目盛り管の接続部から水漏れが生じていないかどうか注意する。長時間おくと気泡が発生して測定が不正確になることがあるので、そのような場合は脱気水を使用した方がよい。

2) 計算

飽和透水係数 K (cm/s) は以下の式で求められる。

$$K = 2.3 \times a \times L / (A \times t) \times \log_{10} (h_1/h_2)$$

ここで、 a ：変水位目盛り管の断面積 (cm²)、 L ：試料の長さ (cm)、 A ：試料の断面積 (cm²)、 h_1 ：水槽内の水面から目盛り管上部線までの高さ (cm)、 h_2 ：水槽内の水面から目盛り管下部線までの高さ (cm)、 t ：目盛り管内の水位が上部線から下部線まで下降するのに要した時間 (s)。

通常用いられている100mL採土管では、 $L=5.1$ cm、 $A=19.6$ cm²、DIK-4012や4050型製品では、変水位目盛り管の断面積 $a=0.5$ cm²なので、これらの機器を用いた場合の飽和透水係数は以下の式で求められる。

$$K = 2.3 \times 0.5 \times 5.1 / (19.6 \times t) \times \log_{10} (h_1/h_2) = 0.299/t \times \log_{10} (h_1/h_2)$$

3) 使用する器具

土壌透水性測定装置 (DIK-4012、4050など)

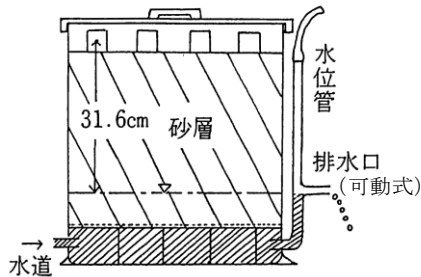
4) 補足説明

- (1) 変水位目盛り管には上部線と下部線が記されている（通常は間隔10cm）が、下部線の高さは試料の透水性の大小に応じて適当に設定し、必ずしも水面が10cm下降するまで測定する必要はない。
- (2) 測定値は、例えば 1.78×10^{-6} cm/sという形で示されるが、一般には指数部の値（オーダー）が分かれば十分である（例、-2乗オーダー、-8乗オーダー、など）。1日は約 10^5 秒であるので、-5乗オーダーでは1日に約1cm（正確には0.86cm）の透水があると判断される。
- (3) 透水係数が-7～-8乗オーダーの場合は水位低下が極少のため、1日以上測定を続ける必要はない。
- (4) この方法は、ある土層のごく狭い部分についての測定値を得るものであり、ほ場全体の透水性を代表するものではない。
- (5) 水の粘性を考慮して温度係数を乗ずるのが原則だが、実用上は省略しても支障ない。

1. 6 保水性（砂柱法、加圧板法、遠心法）、易有効水分

1) 操作

(1) 砂柱法（pF1.5以下）



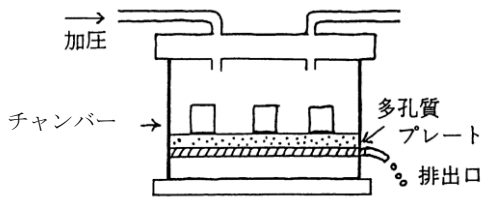
砂柱装置の構造とpF1.5の水位設定例

砂柱装置の排水口高さを砂柱上端に固定して吸水口から給水し、水位を砂柱表面まで上昇させて砂層中の空気を追い出す。

表面を均した後、砂柱がごく浅く水沈した状態で、飽水した採土管試料を静置し、排水口を所定の位置まで下げ、試料からの脱水が終了するまで放置する。多くの場合、脱水に要する時間は1～2日間程度である。

pF値と試料中心から水位までの距離L (cm) との関係は、 $L=10^{pF}$ で表される（例えば、pF1.0ではL=10cm、pF1.5ではL=31.6cm）。

(2) 加圧板法（pF1.5～3.2程度まで）

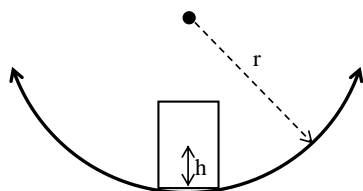
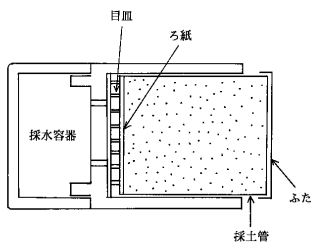


加圧板装置の構造

1～2日水に浸した多孔質プレート（素焼板）を加圧板装置チャンバーにセットし、砂柱法での測定を終えた採土管試料を多孔質プレート上に置く（試料が崩れにくい場合はろ紙を外してもよい）。採土管試料とプレートとの密着を良くするため、プレートを脱塩水で飽和させた後、チャンバーを閉じて加圧ポンプを作動させ、所定の圧力で加圧する。

排出口からの排水が出なくなったら（目安として、pF2.0で1～2日、pF2.7で3～4日、pF3.2で7～10日程度）、排出口を閉じた後に排気バルブを徐々に開けてチャンバーを大気圧に開放する。段階的にpFを変えて測定を繰り返す時は、pFの低い方から高い方へ順に測定していく。

(3) 遠心法（pF2.0～4.2まで）



ろ過筒の構造（上）と遠心法の概略（下）

100mL採土管試料を目皿にろ紙を敷いたろ過筒（遠心分離管）に入れて水平ローターにセットし、高速遠心機に取り付ける。通常、ローター内に試料は4個セットできるが、採水容器におもりを入れるなどして、向い合った試料の重さを等しくしておく。ローターが確実に取り付けられていることを確認してから回転数を徐々に上げ、所定の回転数で1～2時間程度脱水する。

pFと回転数の関係は以下の式で表される（100mL用水平ローターの場合）。

$$pF = 2 \log n + \log h + \log (r - h/2) - 4.95$$

ここで、r：試料下端までの回転半径（cm）、h：回転円周から試料の中心までの高さ、n：回転数（rpm）。

よって、所定のpFとするための回転数は、 $pF = \log H$ （Hは水柱高）として、以下の式で求められる。

$$n = [H / \{h \times (r - h/2) \times 1.118 \times 10^{-5}\}]^{1/2}$$

2) 計算

各pF段階で重さを測定（ろ紙を付けたままの場合は、ろ紙の重さを考慮）し、すべての測定終了後に105℃の乾燥器で2～3日乾燥後、その重さを測定する。これらから各pF段階での含水比または体積含水率を算出し、土壌の保水性を以下の特性値等を用いて表示する。

- (1) pF水分曲線：横軸をpF値、縦軸を含水比または体積含水率とし、両者の関係を曲線で近似したもの。
- (2) pF水分分布曲線：単位pF変化量に対する含水比または体積含水率の変化量（ Δw 、 $\Delta \theta$ ）の関係を、横軸をpF値、縦軸を Δw または $\Delta \theta$ としてプロットし、曲線で近似表示したもの。
- (3) 易有効水分：pF1.5～2.7またはpF1.5～3.0領域の体積含水率の差（ cm^3/cm^3 、%、 $\text{mL}/100\text{cm}^3$ などとして表示）。下限をpF1.8にとる場合もあり、統一の見解はない。pF1.5（1.8）～4.2領域の水分を全有効水分と言う。

3) 使用する用具、装置

(1) 砂柱装置

pF1.5以下の水分状態に調整する装置。市販品（DIK-3521）があるが、自作も可能である。前ページには中央農試で用いているものを示した。使用する砂は0.25mm以下の粒径が規定されており、細かい石英砂が良いが、海砂をふるって使っても良い。

(2) 加圧板装置

一般には市販品（DIK-3404、DIK-3423）を使用する。一度に最大24点の試料が測定可能である。できるだけ温度変化の少ない所に置くことが望ましい。通常、測定するpFは1.8～3.2程度であるが、設定pFの段階を多くすると、かなり長期間（場合によっては2ヶ月以上も）かかる。なお、DIK-3404ではpF4.2まで測定可能であるが、100mL採土管では試料の量が多いため、排水が終了するまでに非常に時間がかかる。

(3) 高速遠心機

市販の土壤溶液採取用のろ過筒（遠心分離管）および水平ローターがセットできる遠心機を用いる。通常は冷却機能があるので、20～25℃の室温レベルで実験を行う。1回の測定につき少なくとも1時間を要するため、1日当たり5～6回しか測定できず、多数の試料を設定pFを変えて測定する場合は長期間が必要となる。遠心法では遠心力により試料が圧縮され、他の方法で求めた水分特性値との連続性が必ずしも良くない。近年は、加圧板法やサイクロメータ法による高pF領域の水分測定が普及しているため、「土壤環境分析法¹⁾」の保水性に関する記述では、遠心法の説明は割愛されている。

4) 補足説明

- (1) 遠心法は主に日本で行われ、国際的には加圧板法が標準法である。従って、pFを0～4.2まで連続測定するには、砂柱法（pF1.5）～加圧板法（pF1.5～3.2）～遠心法（pF3.2～4.2）の順に3方法を併用して使う例が多い。
- (2) 加圧板法で長期間測定を行うとろ紙が破損する場合がある。この場合はガラス繊維ろ紙を使うと良い。

5) 参考文献

- 1) 土壤環境分析法編集委員会. ”土壤環境分析法”. 東京, 博友社, 1997, p. 48-66.

1. 7 三相分布、乾燥密度（仮比重）、最大容水量

1) 操作

①現地水分状態またはpF1.5の水分状態に調整した100mL採土管の重さ（管とふたを含む）を測定。

→A (g)

注) 風乾細土について測定する場合は、100mL採土管に風乾細土を軽く充填した後、卓上で軽く5回たたき、管上部の空間にさらに風乾細土を軽く充填した状態のものを用いる。

②三相計で実容積（100mL中の固相体積＋液相体積）を測定。→B (mL)

③105℃の乾燥器で一定重量になるまで（24時間以上）乾燥し、重さ（管とふたを含む）を測定。

→C (g)

また、管とふたの重さを測定（試料採取前に測定しておいてもよい）。→D (g)

2) 計算

(1) 固相率（100mL中の固相体積の割合、%）＝100－液相率－気相率＝B－（A－C）

(2) 液相率（100mL中の液相体積の割合、%）＝A－C

(3) 気相率（100mL中の気相体積の割合、%）＝100－B

注) 固相率、液相率、気相率を示すときは、「現地水分状態」か「pF1.5の水分状態」かを明記する。

(4) 孔隙率（100mL中の孔隙の割合、%）＝液相率＋気相率＝100＋A－B－C

(5) 乾燥密度（g/cm³）＝単位体積当たりの固相の質量＝（C－D）/100

注) 水の密度に対する乾燥密度の比を仮比重という。水の密度を1g/cm³とすれば仮比重＝乾燥密度。

また、100mLあたりの固相重を容積重（g/100mL）と呼ぶ。容積重を示すときは、「現地容積重」か「風乾細土容積重」か明記する。

(6) 最大容水量（孔隙が飽和した時の含水比、%）＝孔隙率/（乾燥密度×100）×100

(7) 真比重＝固相重/固相率（無単位）

3) 使用する用具、装置

(1) 三相計（実容積測定装置）

市販品（DIK-1130、1150）を使用する。操作方法は取り扱い説明書に従う。

4) 補 足

(1) 100mLの採土管では採取スケールが小さすぎる場合（例えば、砕土が不良な粘質土畑の作土など）は、2Lの採土管（内径16cm×高さ10cm）またはその同等品を使うと良い。現地で2L容の試料を採取した後、直ちに採土管中の土をビニール袋にあげて密閉し持ち帰り、重さをはかる。その後、速やかに土を細かく砕き、均一にした後、そのうちの一定量を100mL採土管に手で詰め、通常の方法で三相分布を測定する。これにより、2L容での三相分布が計算できる。

(2) 有機物が多くない通常の土の真比重は2.65前後（2.5～2.8）である。

(3) ここでは最大容水量を計算で求めたが、Hilgard法（一定容器に試料を詰め、底面から自然吸水させてその増加量を計る）あるいはそれに準じた方法で測定することもできる。また、「土壤環境分析法¹⁾」では、「ろ紙で底を付けた100mLの採土管に2mm以下の風乾細土を机上で軽くたたきながら粗の状態に充填して毛管飽和させ、採土管ごと炉乾させたときの含水比」と定義されている。

5) 参考文献

1) 土壤環境分析法編集委員会. ”土壤環境分析法”. 東京, 博友社, 1997, p. 48-66.

1. 8 団粒分析（水中篩別法による耐水性団粒）

1) 操作

- ①採取試料は日陰で風乾し、含水比がほぼ塑性限界以下（指がぬれない状態）になった後、指で砕きながら8mmのふるいを軽く振って通す。（指で砕くときは必要以上に細かくはしない）
- ②調製した試料25gをビーカーに入れて水没するまで水を加え、1昼夜（約20時間）浸漬する。同時に、水浸前に試料を別に10g程度とり、含水比を測定しておく。
- ③5組のふるいからなる水中篩別機を用意し、ふるいを最高位置に固定して、試料を最上部のふるい(2mm)上に静かに移し、一面に薄く広げる。水槽の外外に沿ってふるいに水がかからない様に静かに注水してふるい上部1cmの水位にする。次に、組ふるいの上下動を10分間行う（組ふるいは水の中で高さ38mmの距離を1分間にほぼ30回上下運動する）。
- ④組ふるいを水中から取り出し、充分水切りをした後、各ふるい上の分離物を注意しながら受器に移す。次に、受器のまま熱風乾燥し、精密に秤量する（この方法は非常に困難なので、水切りしたふるいを直接乾燥させ、バットまたは大判の紙の上に逆さまに置いて上からふるいの網をたたき、乾燥した土砂を落下させて収集する方法が实际的である）。
- ⑤秤量後の各分離物を再び水に浸漬し、指先で団粒をつぶし（あるいはガラス棒の先端にゴム栓を付けたものを使うと便利）、同径のふるい上で粘土分を洗い流して残留した砂を乾燥し秤量する（この方法で砂の分離が困難な場合は、粒径組成の分析法と同様に、有機物の分解と粘土の分散を行ってから砂を分離する）。

2) 計算

風乾試料（25g）の含水比をW、各ふるい分離物の乾重をそれぞれ D_2 、 D_1 、 $D_{0.5}$ 、 $D_{0.25}$ 、 $D_{0.1}$ （g）（2～0.1mmの粒径）、各粒径分離物中の同等粒径以上の砂の乾重をそれぞれ S_2 、 S_1 、 $S_{0.5}$ 、 $S_{0.25}$ 、 $S_{0.1}$ （g）とすると、nを任意の粒径として、

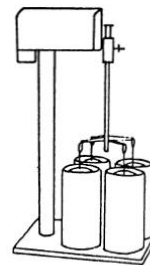
$$(1) \text{ 団粒百分率 (\%)} = (D_n - S_n) \times (W + 100) / 25 \quad (\text{各粒径毎に算出})$$

（各粒径毎の団粒の全乾土重に対する割合）

$$(2) \text{ 集合度 (\%)} = \Sigma (D_n - S_n) \times (W + 100) / 25$$

（一定粒径以上の団粒合計重の全乾土重に対する割合）

ここで、 $n = 2$ なら $\Sigma (D_n - S_n) = D_2 - S_2$ 、 $n = 0.5$ なら
 $\Sigma (D_n - S_n) = (D_2 - S_2) + (D_1 - S_1) + (D_{0.5} - S_{0.5})$



団粒分析装置
(Yorder 型)

$$(3) \text{ 団粒化度 (\%)} = (\Sigma D_n - \Sigma S_n) \times (W + 100) / [2500 - (W + 100) \Sigma S_n] \times 100$$
$$= (\text{基準粒径以上の団粒の重量合計} - \text{同等粒径以上の砂重合計}) / (\text{全乾土重} - \text{同等粒径以上の砂重合計}) \times 100$$

ここで、 $n = 2$ なら $\Sigma D_n = D_2$ 、 $n = 0.5$ なら $\Sigma D_n = D_2 + D_1 + D_{0.5}$ 、 S_n も同様

(3) はある粒径以下の一次粒子（砂以外）のうち何%が団粒化しているかを示す指標。団粒百分率や集合度は全乾土重に対する割合だが、この団粒化度は基準粒径以上の粗粒子（一次粒子ではないもの、つまり砂）を除外した部分に対する百分率である。

1. 9 土の工学的性に関するその他の測定項目の概説

- 1) 比重：土粒子の真比重はピクノメータ法及びルシャテリエ比重ビンによる方法（有機物が多い試料）で測る。乾燥密度（仮比重）は採土管による方法が普通だが、土の塊を直接パラフィンで被覆して測る方法もある。一般の土の真比重は2.6前後、仮比重は1.0前後である。
- 2) 水中沈定容積：土を水中でかくはん後放置すると沈降して底に堆積するが、その時の土の単位質量の占める見かけの体積を言い、土の分散・凝集による土粒子充填の特徴がわかる（復元田の”いつき現象”等）。沈降管（またはメスシリンダー）で測る。
- 3) 液性限界：コンシステンシー（アッターベルク）限界の一つ。土が液体状から粘性を持った塑性状を呈する境界の含水比で、液性限界測定器で測定する。測定器の黄銅皿にペースト状の土を入れ、付属の溝きりで中央に溝を切る。黄銅皿を1cm高さから落下させ、溝の土が1.5cm合流した際の含水比を求める。土の含水比を変えて同様に行い、落下回数対数と、含水比との図から25回落下したときの含水比を求める。この含水比が液性限界である。
- 4) 塑性限界：コンシステンシー限界の一つで、土が塑性状から、成形が困難となる半固体状を呈する境界の含水比。団子状の試料を磨りガラスの上のせて、手のひらでころがしひも状にする。ひもの径が3mmになった際に土が切れ切れになるときの含水比が塑性限界である。
- 5) 収縮限界：コンシステンシー限界の一つで、含水量をある量以下に減じてもその土の体積が減少せず、含水量がその量以上に増せば土の体積が増大するような含水量を含水比で表したもの。水銀置換法またはノギス等で乾燥前後の土の体積を正確に測定する。
- 6) 通気性：土壌の通気性を表す特性値として、空気圧力の勾配に基づく通気係数と、ガスの拡散移動に基づくガス拡散係数がある。通気係数については市販の土壌通気性測定器（大起理化工業製）、ガス拡散係数についてはガルバニ電池式O₂センサーを用いた遅滞式拡散係数測定装置（自作必要）などを用いて測定する。
- 7) 分散率：雨水による畑土壌の侵食されやすさ（受食性）や耐水性団粒の多少を示す指標で、ミドルトン法が通常用いられている。完全分散した後のシルト・粘土含量に対する、蒸留水のみで分散した後の同含量の重量%を分散率と言う。
- 8) スレーキング：土塊を水中に浸漬したり湿潤にすると、破壊して微細化することを言い、粘質土に特有のもので、土性、構造、水分状態等多くの要因が関与する。水中で24時間おいた後の、全乾土重に対する、崩落して5mm網目を通った土の乾重%を崩落率という。
- 9) ベーンせん断：現場での迅速測定を目的とし、土中に十字型の翼のついたロッドをさし込み、これを回転するのに要する力をトルクレンチで測定し、土のみかけの粘着力を表す指標である。SR-2型測定器でも測定できる。
- 10) 一軸圧縮：せん断試験の一種で、粘性土斜面の安定性や地盤の支持力計算に主に利用される。円柱状の土塊を側方拘束のない状態で圧縮して、その圧縮強さを調べる（通常、一軸圧縮試験器を用いる）。碎土性をこの方法で評価する場合もある。
- 11) 締固め：盛土や路床の安定度合、水田の漏水防止法の評価を目的とし、ある一定の締固め方法により各段階での土の含水比と乾燥密度を求めてグラフにプロットし（締固め曲線）、最大乾燥密度や最適含水比を求める。専用の締固め用具を用いる。

2. 現場測定

2. 1 土塊分布（碎土性）

1) 操作

①現地での試料採取：碎土作業後、なるべく速やかに、50cm四方について耕起深（ロータリ耕の場合は10～15cm程度）までの全土壌を採取する。室内で測定する場合は、バットなどの容器に入れて持ち帰っても良い。5cm以上の大きな土塊がない場合は、直径20cm程度の円筒を採取深度まで打ち込んで、角形シヨベルですくい上げると採取しやすい。

②ふるいによる分別：現地または室内で、試料を速やかにふるい分けする。ふるいの孔径やその数は目的によって異なる。ロータリ碎土後の転換畑の場合は、孔径4、2、1、0.5cm程度のふるいが必要で、単に碎土率を出すためだけであれば2cmのみで良い。また、トラクターなどの機械作業の効果を評価する際には、1、2、3、4、5、7cmの6個のふるいを使う場合もある。ふるい分けした土は風乾して、重さを計るが、生土のままでも良い。

2) 計算

ある粒径の風乾土重をWとし、それらを全部合計した重さをWT、とすると、

$$\text{重量百分率（\%）} = W / WT \times 100$$

$$\text{碎土率（\%）} = (\text{粒径が2cm以下の土塊のWの合計}) / WT \times 100$$

3) 使用する用具

50cm角ふるいは径30～40cmの円形の網目ふるい。

4) 補足説明

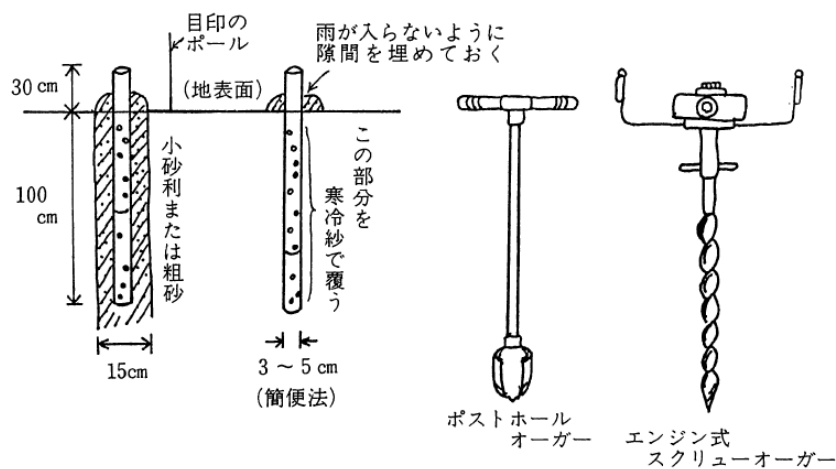
- (1) 碎土性の測定は、耕起・碎土機械の性能評価の面からと、作物の出芽率・初期生育と土壌の物理性との関係把握の面から行われることが多い。土壌肥料分野においては2cm以下の土塊の重量割合を碎土率とし、作物の良好な出芽のためには70%以上が望ましいとされている。しかし、この基準は、昭37～38年の試験をもとにした、「水稻の乾田直播栽培の地帯別耕種基準」の中の碎土条件として示された数字で、各作物や土壌条件ごとの碎土性と出芽率との関係を明らかにする必要がある。
- (2) 粘質土の畑にパークたい肥やピートモス（泥炭）などを大量に客入して物理性を改善したほ場においては、上記の重量百分率で碎土性を表わすことは問題がある。これは、客入有機物が軽く、重量的にはカウントされにくいため、これを補正するためには、例えば“体積百分率（体積碎土率）”などの表示方法を考慮する必要がある。

2. 2 地下水位

1) 操作

①現地ほ場にボーリングスティック（検土杖）またはスクリー式のオーガー（手動式またはエンジン動力式）で径3～15cm程度、深さ1m程度の細長い穴をあける。次に、測水管を寒冷紗や不織布などで包み、静かに穴にさし込む。15cm程度のやや広い穴をあけ、中心に測水管を入れてまわりのすき間を小砂利や粗砂で埋める方法が望ましいが、かなりの労力を要するので、一般には径3～5cmの穴に測水管をさし込むだけの方法によっている（ただし、この簡便法は、穴の内壁部が練りつぶされて水通りが悪くなり、周囲の地下水位が測水管内の水位に十分には連動しない場合があるので注意を要する）。

②設置後1～2日経ってから水位測定を始める。管内の水位の測定には、ハンディタイプでその都度計測する方法と、ロガーによって自動計測する方法がある。その都度の計測には、水に触れるとブザーが鳴る市販の装置（お風呂ブザー）を、目盛をつけたポールなどにつないで水位を測定するのが安価で便利である。



2) 用具

- (1) ボーリングスティック：市販品あるいは特注品。径3～5cmのものが人力で土中にさし込める限界であろう。堅い粘質の土壌では1mまで穴を開けるのはかなりの労力を要する。
- (2) スクリーオーガー：オーガーとは、土を掘削し試料を保持する機能を持つきりもみ式の器具のこと。ポストホール式とスクリー式があるが、3～5cm程度の細長い穴をあけるにはエンジン式スクリーオーガー（例えば、コマツゼノアのアースオーガーは約10万円で、スクリー径も20mmからある）が便利。人力によっても径10～15cmのスクリー式オーガーは使用可能だが、かなりの労力を要する。
- (3) 測水管：軟質の塩ビ管で自作が容易である。例えば、VP-25（内径25×外径33mm）またはVP-30（内径30×外径38mm）が適当で、4m単位で売られているものを1.3mずつ3本に分けると良い。下端側約70cmの部分には電気ドリル等を用いて径5mm程度の孔を多数あけておく。管の底にゴム栓をさし込んだり、あるいは寒冷紗のような網目のもので管を覆ってからさし込むと、泥や泥炭カスがつまりにくい。
- (4) 水位センサー：ロガーと一体型になった水位センサーが10万円程度で販売されている。

2. 3 貫入抵抗

本項目では、具体的操作記述を割愛し、各用具の特徴等について概説した。

1) 原理

現場で簡易に土の力学特性（主として地耐力）を判定する方法（サウンディングと言う）として、物体を土の中に貫入させる方法があり、その時に要する力を一般に貫入抵抗と言う。

物体の貫入法としては、静かに圧力をかけておし込む方法（静的貫入）と衝撃によって打ち込む方法（動的貫入）とがあり、SPAD自記硬度計（以下、貫入式土壤硬度計と記す）、SR-2型硬度計、コーンペネトロメータ等は前者である。

2) 測定用具の各論

(1) 貫入式土壤硬度計（DIK-5521、5530、5531）

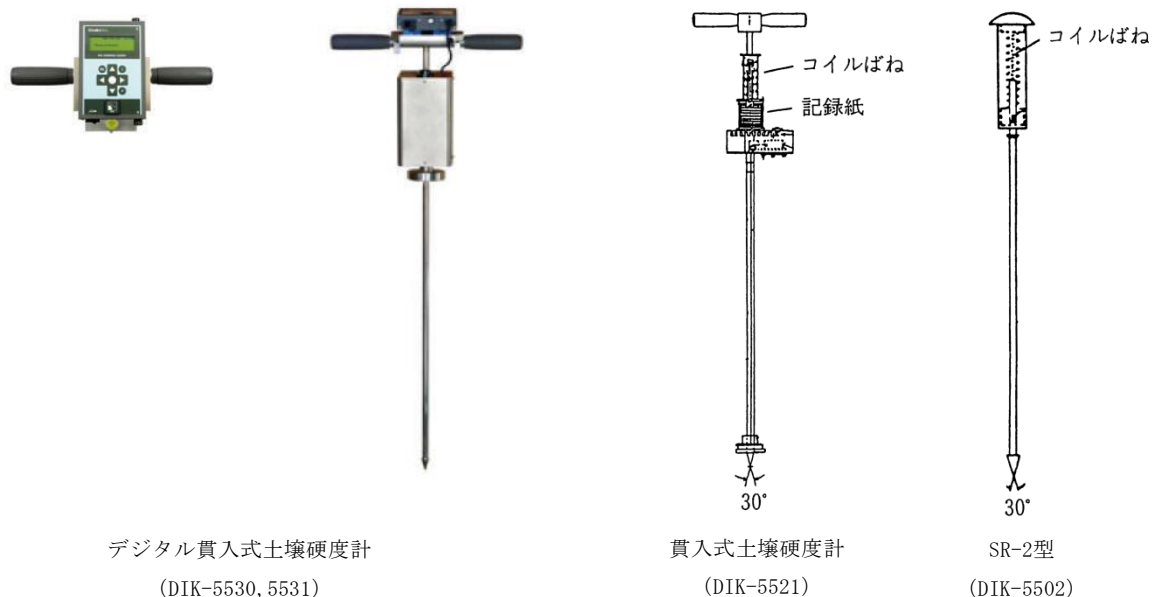
後述するSR-2型をベースとして、貫入抵抗値が深さ毎に連続して測定される。ドラムに記録紙を巻き付けペンにより記入されるDIK-5521は、多くの試験場や普及センターで使用されているが、現在製造中止となっており、デジタル式（DIK-5530、5531）に置き換わっている。1人で作業可能で、土壤硬度が視覚的にわかり易い形で記録できる便利な装置である。コーンはSR-2型と同じ底面積 2cm^2 、頂角 30° 、測定可能な深さは最大90cmである。目盛りはMPaとして表示される。

(2) SR-2型土壤抵抗測定器（DIK-5502、5503）

もともとは大型機械の走行性判定のために開発されたものであり、2種類のバネと、6種類の先端部がついており、目的や土壤の状態に応じて使い分けられることができる。現在は貫入式土壤硬度計同様、デジタル式のみ販売となっている。先端のコーンは、通常頂角 30° 、底面積 2cm^2 の小コーンを使うが、底面積 6cm^2 のものもある。コイルバネは最大荷重50kgのものを通常使うが、25kgのものもある。深さは40cmまで可能。先端の測定具は大、小のコーンの他に矩形板（2種類の面積）、せん断抵抗、摩擦抵抗などの測定具がある。

3) コーン抵抗の測定に関する補足・注意

静的貫入と動的貫入の両者間の測定値を相関づけるのは困難である。コーンによる静的貫入抵抗は比較的簡単に測定できるが、注意を要する点も多い。例えば、コーン指数で $6\text{kg}/\text{cm}^2$ とは、この土が $6\text{kg}/\text{cm}^2$ の荷重に耐えられることを意味するわけではない。また、同じコーン指数を示しても粘性土と砂質土とは、その値の意味は異なる。すなわち、コーン指数は土の力学的性質そのものを意味していない。コーン指数に影響する因子としては、コーンの形状、貫入速度及び土性があり、前二者を一定とすると、ある土におけるコーン指数は土の諸性質（密度、含水比、粒度）と密接な関係にある。なお、コーン先端は摩耗して丸くなっていると測定値に影響を与えるので随時交換する。



デジタル貫入式土壤硬度計
(DIK-5530, 5531)

貫入式土壤硬度計
(DIK-5521)

SR-2型
(DIK-5502)

2. 4 土壌の硬度（山中式土壌硬度計、プッシュコーン式硬度計、クラスト硬度計）

本項目では、具体的操作の記述は割愛し、各用具について概説した。

1) 山中式土壌硬度計

土壌調査で一般に使われる用具で、コーン（円すい）は高さ4cm、底径1.8cm、頂角 $12^{\circ} 50'$ で、バネは40mm縮少に対して8kgの圧力を有するもの。目盛は指標目盛（1～40mm）と絶対硬度（ kg/cm^2 ）が付いているが、一般には指標目盛を使う。本体側面の目盛の部分から土が入り易いので、時々分解して掃除する必要がある。

2) プッシュコーン式土壌硬度計（DIK-5553）

前記山中式土壌硬度計と同じ原理だが、本体側面にスリット（目盛と遊動指標）がないので土が本体内部に入りにくいという利点がある一方、山中式に比べて目盛の読みはやや判りにくいという欠点もある。

3) クラスト硬度計（DIK-5561）

上記の山中式と同じ作動原理に基づいており、先端部が2種類（高さ5cm、底径0.8cm、頂角 $5^{\circ} 55'$ の尖ったコーンと、先端が径0.8cmの球状になっているもの）、およびバネが3種類（1、2、4kg/40mm当り）ある。実際の使用は、これらのうち、最も適当と思われる数値が得られるような先端部とバネの組合せを選んで行すが、通常は球状の方がクラストの強度測定には適している。

4) 山中式土壌硬度計とSR-2型、貫入式土壌硬度計測定値との読み替えについて

(1) SR-2型の小コーン（底面積 2 cm^2 ）による測定値を $x(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 、山中式の測定値を $Y(\text{kg}/\text{cm}^2)$ とすると、経験的に $Y = -0.04 + 0.63x$ の式が知られている。

(2) 貫入式土壌硬度計（底面積 2 cm^2 の小コーン）の測定値を $x(\text{MPa})$ 、山中式の測定値を $Y(\text{mm})$ とすると、 $Y = 7.72 \ln(x) + 16.5$ の関係が求められている¹⁾。

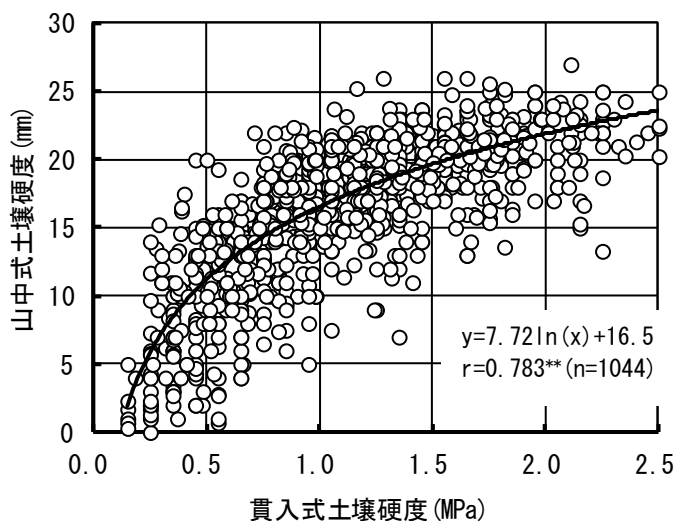


図3 貫入式土壌硬度と山中式硬度の関係

5) 参考文献

1) 中津智史ら. “耕盤層の簡易判定法と広幅型心土破碎による対策”. 土肥誌, 75(2), 265-268 (2004).

2. 5 畑地浸入能（シリンダーインテークレート法）

1) 操作

- ①直径20～30cm、高さ30cmの鉄製の円筒（シリンダー）を土壌面にしっかりと押しつけ、打ち込み鉄板（または太い角材）を円筒の中央に置き、ランマーまたは掛け矢で円筒の頂部を水平に保ちながら徐々に打ち込む。打ち込み深さは15～20cmとする。農試で主に使用している円筒は、堅密な台地土にも対応するため、外径165mmのステンレスパイプ（H=400mm）に先端部を強化加工した刃を取り付けたものである。
- ②円筒の外側約10cmの所に土手を設けるか、径の異なる円筒、トタン板、あぜシートなどを打ち込み、緩衝留（水位差による浸入誤差を防ぐためのもの）とする。この方法は多量の水を使用するため、特に調査点数が多い場合や、透水性が不良なほ場などでは省略してよい。
- ③打ち込み後に円筒内外の壁面にできた隙間を指の腹で押さえて埋める。次に後述の減水深測定で使用するフックゲージを円筒に取り付ける。フックゲージがない場合はモノサシを円筒内側にさし込むことでも対応可能である。
- ④ストップウォッチを用意し、小バケツに水を入れ、シリンダー内に注水する。その際に軍手やウエスに水をあてながら行い円筒内の土壌の攪乱を抑える。円筒内の土壌面にビニールシートを敷き、注水して測定開始直前にビニールシートを外す方法もあるが、煩雑となることや測定水位が乱れてしまう。
- ⑤シリンダー上部まで注水後、すぐにフックゲージを調節し時間計測を開始する。始めの水位を記録しその後一定時間毎に水位を記録する。時間配分は0、1、2、3、5、10、15、20、30、60分が目安であるが、水位の低下が早い場合は水の補給が必要で、補給前後の水位を記録するとともに時間調整を行う。記録数は7～8点以上になるようにする。



シリンダーインテークレート法の測定状況



シリンダーへの注水状況

2) 計算

両対数グラフの横軸に経過時間 (t分)、縦軸に積算浸入量 (D mm) をとって、経過時間ごとの積算浸入量の測定値をプロットすると、ほぼ直線となる。

$\log D = n \log t + C$ より、 $D = C t^n$ となる。

D: 積算浸入量 (mm)、t: 経過時間 (分)、C: 定数、n: 定数 (勾配)

($\log D$ をY、 $\log t$ をXとすると、 $Y = nX + C$ の式から最少二乗法により計算できる)

上式を微分するとインテークレート (I、浸入度) となる。 $I = 60Cn t^{n-1}$ (mm/h)

インテークレートの変化率が初期インテークレートの10%になった時のインテークレートをベーシックインテークレート (基準浸入能、 I_b) と言い、その算出式は

$I_b = 60Cn \{600(1-n)\}^{n-1}$ (mm/h) となり、Cとnから I_b を求めることができる。

3) 補足説明

(1) 時間の経過と共に単位時間ごとの水位低下量が減少しない場合は、 I_b の算出ができないため、60分以上の測定が必要である。また、60分経過時点においても水位低下量が10mm未満の場合も60分以上の測定が必要となるが、 I_b が1mm/hを下回る極低値となるため、詳細なデータを必要としない場合は1mm/h未満としても差し支えない。

(2) ベーシックインテークレートは測定部周辺土壌の亀裂や孔隙、構造の発達程度と密接に関連しており、転換畑での大豆に対する指標値が示されている¹⁾。

4) 参考文献

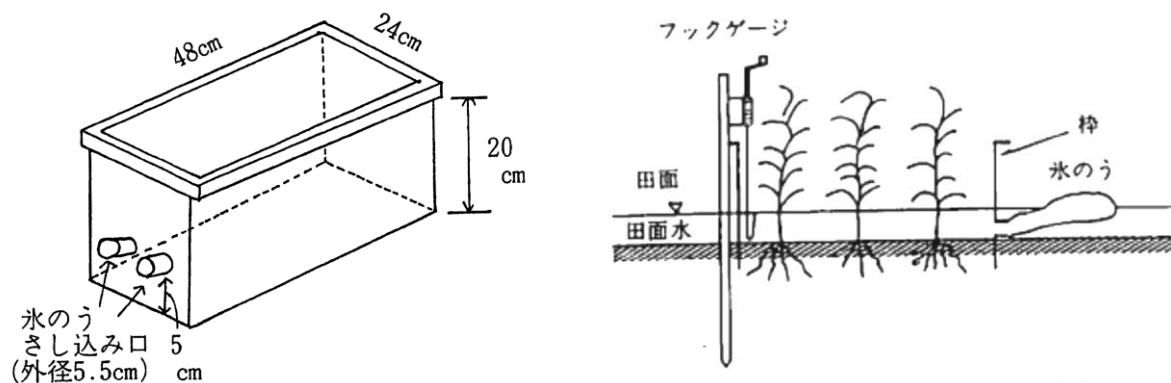
1) 塚本康貴ら. “転換畑における大豆の生産力判定のためのシリンダーインテークレート法による土壌物理性評価”. 農業農村工学会誌, 76(2), 138-139 (2008).

2. 6 減水深（水田のたん水期の降下浸透量）

1) 操作

①あらかじめゴム袋（氷のうが便利）を2個取り付けたN型減水深測定器を、中心に3～4株の水稲が入る様にして静かに作土内に約5cmの深さでおし込む。作土の表面に踏み跡や雑草等がない、なるべく平らな場所を選び、さらに、枠外の水を波立たせても枠内の水には影響がない（明らかな水の通り路はない）ことを確認しておく。水田内の水の出入りは止めておいた方がよい。

②次に、枠内にモノサシまたはフックゲージをセットする。ゴム袋を一たん持ち上げて袋内の水を枠内に戻し、その時の水位を記録しておき、さらにゴム袋を空気が入らない様にして元に戻しておく。1～2日後に同様な方法で水位を読む。通常は一枚の水田に3個セットし、さらに枠の近くに、一筆減水深を測る目的でモノサシを1～2本田面にさし込んでほ場全体の水位の低下を測定しておくといよい。



N型減水深装置の概要（左）と設置例（右）

2) 計算

セットした1～2日後に水位を読み、その差より1日当りの減水深（mm/日）を出す。

3) 用具

- (1) N型減水深装置：ステンレス（鉄）製の、24×48×高さ20cmの無底枠で、ゴム袋の取り付け口が2ヶ付いている。（株間の距離を12cmとすると、4株入ることになる）
- (2) ゴム袋：市販の咽喉用氷のうを用いるとよい。
- (3) フックゲージ：先端が尖った針金を微妙に上下させることにより水位を精密に測る装置である。

4) 補足説明

- (1) (N型による) 減水深＝蒸発散量（株間水面蒸発量＋葉面蒸散量）＋降下浸透量
ほ場全体の一筆減水深＝蒸発散量（同上）＋浸透量（降下浸透量＋アゼ浸透量）
一般に、北海道の水田の夏の蒸発散量は2～3mmとされている。
- (2) 減水深が10mm前後以下で小さい場合は、径20cm程度の円筒（塩ビ、鉄）を単にさし込んでもよい。
ただし、水田の水の出入りは止めておくこと。
- (3) 氷のう（ゴム袋）は枠内外の水位差の調節が目的で、2袋で20mmまでの水位差に対して有効。また、日照と水浸のくり返しに弱いので、長期の場合は5～10日に1回程度新品と交換する必要がある。
- (4) 枠内の減り方が枠外より小さい場合は、開始時のゴム袋を空に近い状態から始め、大きい場合にはその逆にゴム袋に水がいっぱい入った状態から始める。

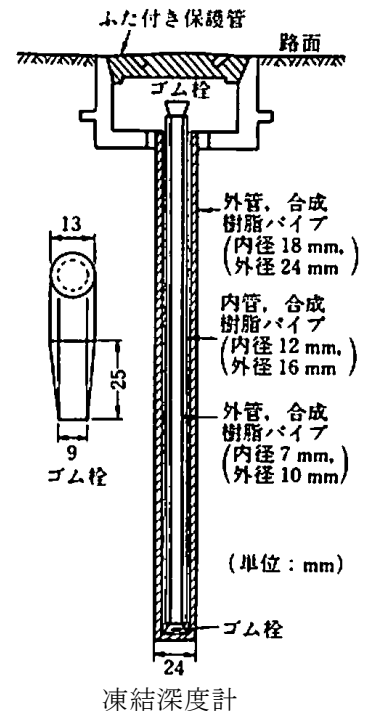
2. 7 凍結深度

土の凍結深さを測定する方法として、凍結期に直接土壌を掘削して目視で確認する方法、凍結深度計を埋設して観測する方法、熱電対や温度測定機器を土中に設置して温度分布から推定する方法がある。以下に比較的製作、測定が容易なメチレンブルーを用いた凍結深度計について説明する。

1) 概要

メチレンブルー凍結深度計は塩ビパイプなどの外管と、透明アクリルチューブの内管から構成されており、内管に0.03%のメチレンブルー溶液を封入したものである¹⁾。メチレンブルー溶液は凍結すると白色になるので凍結位置を目視で把握しやすい特徴がある。

図で示した凍結深度計は蓋付き保護管の中に埋設する形であるが、農地の凍結深を測定する場合には、地下水位を測定する際の測水管のように、地上部につきだした簡易的な構造でよい。以下に簡易な構造の凍結深度計について記載する。



2) 作成、設置方法

- ①構造は、無底の外管と、有底の中管、メチレンブルーの入る密閉した透明な内管の三層構造である。各管の長さは1.5～2.0mで、内管を若干長くすると測定時の際に引き出しやすい。
- ②中管の底を、接着剤などでふさぐ。ゴム栓でも良いが外管に入る大きさにする。
- ③0.03%メチレンブルー溶液を作成し、内管の中に溶液を入れる。
- ④内管をゴム栓などで密閉する。内管を透明アクリル管にする場合は、凍結の際の膨張による破損を防ぐため、径の小さなゴム管を挿入する。内管自体を透明チューブにして膨張による破損を防いでも良い。
- ⑤内管に地表面をゼロとして油性マジックで目盛を付ける。管が地表面から1m程度出ると測定しやすい。また測定時に抜き出して別途定規で計測しても良いが、地表面のラインは入れておくこと。
- ⑥測定地点にオーガー等で穴を開け、無底の外管を設置する。外管の中に中管、内管を挿入し、外管の蓋をして完成。

3) その他

メチレンブルー凍結深度計は自作可能であるが、市販されているものもある（1本2万円程度）。

4) 参考文献

- 1) 土質工学会編．“土の凍結—その理論と実際—[第1回改訂版]”．第1回改訂版，東京，土質工学会，1994，p. 80—81．

2. 8 水田土壌の酸化還元電位 (Eh)

水田土壌のEh測定法には、採取土壌のEhを測定する間接法と、ほ場で測定する直接法がある。間接法は直接法に比べて値は安定するが、採取後の土壌と空気との接触により高い値となる傾向にあることから、ほ場の還元状態の差をみる場合には、直接法が適している¹⁾。以下に直接法について説明する。

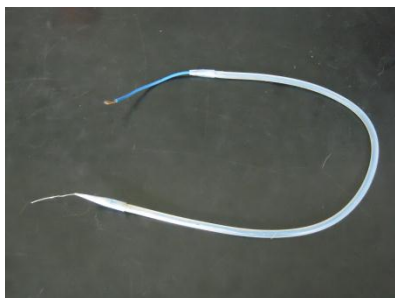
1) 設置、測定

- ①白金電極を測定深度まで差し込み（通常は5cm深程度）、電極を支柱などで固定する。電極が動くと電極と土壌の接触部に隙間ができ、値が安定しない可能性があるため支柱は曲がりにくい固定できる物がよい。また、白金電極のプラグ部分が濡れないよう、カバーなどで覆う。
- ②予め動作確認や校正の終わったポータブルEhメーターにて、比較電極を田水面に浸し、白金電極と接続して測定する。なお白金電極の設置後、Ehの値が安定するまでに1日程度必要であるため、ほ場での測定は設置後1日以上経過した後とする。

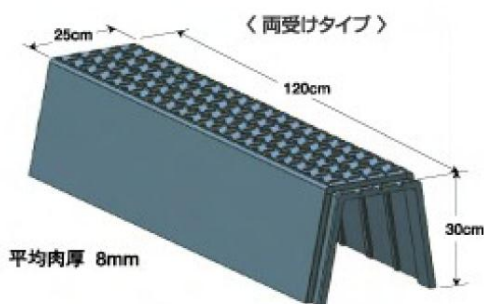
2) 用 具

- (1) 白金電極：自作が可能。以下に中央農試で使用している自作の白金電極について説明する。

シリコンチューブにビニール被覆した銅線（公称断面積 0.75mm^2 ）を通す。シリコンチューブは銅線より短めにする。白金線（ $\phi 0.5\text{mm}$ 、1mで7万円程度）5cm程度を銅線にハンダ付け（圧着でも良い）する。接合部および反対側のシリコンチューブの端をエポキシ系接着剤やコーキング材などで接着し、白金線と導線との接続部の絶縁をするとともに、雨水などの浸入を防ぐ。接着の際に、シリコンチューブの中に注射器などで接着剤を注入し、スポイトやチップの先端をかぶせて接着すると良い。



自作の白金電極



畦畔カバー

- (2) ポータブルEhメーター：土壌用のEh測定器として藤原製作所製の土壌用pH/硝酸/Eh計（10万円程度）がある。

3) 補足説明

- (1) ほ場内の測定箇所によるばらつきが大きい傾向にあるため反復数はできるだけ多くした方が良い。
- (2) 測定位置周辺の土壌を攪乱しないよう、別途足場を組むと良い。足場には水田畦畔用として販売されている「畦畔（あぜ）カバー」を使用すると便利である。
- (3) 白金電極は長いほど値が安定するまでの時間が短くなることや、白金電極を目の小さなサンドペーパー（#1000程度）で研磨すると、値が安定するまでの時間が短くなるとの報告がある²⁾。

4) 参考文献

- 1) 長谷部亮ら．“水田土壌Eh測定法の比較”．土肥誌，53(6)，545－546（1982）．
- 2) 村上大亮ら．“水田土壌のEh測定に用いる白金電極の反応”．土壌の物理性，106，3-10（2007）．

2. 9 現場における自記測定（地温、土壌水分、pF）の概要

本項目については、主に市販されているロガー接続用のセンサーについて記述する。

1) 温度センサーの種類と特徴

(1) 熱電対センサー

電気的な温度計測法として最も一般的で、安価で自作が容易である。欠点としては温度と出力が直線的でなく（ただし、通常の範囲では問題ない）、他のセンサーに比べて精度がやや低いことである。

(2) 測温抵抗体センサー

金属の電気抵抗が温度の上昇と共に大きくなることを利用したもので、通常白金が使われている。熱電対よりは出力の直線性は良く、精度が高いが、欠点としては、応答が遅いこと、自己発熱があること、熱電対法より回路が複雑になること、高価であること等である。

(3) サーミスタ温度センサー

半導体の電気抵抗の温度依存性を利用したもので、温度に対して敏感であり、測定が容易である。欠点としては、素子ごとに温度反応特性が異なるためセンサーとしての本質的な互換性はないことである。しかし、実際の製品は補償回路を組込むことにより実用的なレベルでの互換性は保たれている。

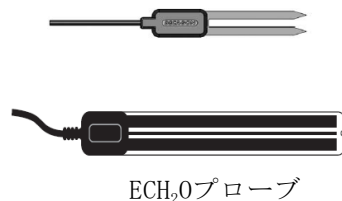
近年はロガーとセンサー部が一体となったボタンタイプ（Watch Dog、サーモクロンなど）や無線通信でデータ収集が可能なもの（おんどとりなど）など、多様な製品が比較的安価で販売されている。

2) 土壌水分・pF（土壌水分張力）用センサーの種類と特徴（いずれもデータロガーに接続可能なもの）

(1) 土壌水分計

① 静電容量法

比誘電率は水が約80、土が約3～5、空気が1と大きく異なるため、含水量が増加すると比誘電率が増加する。静電容量が比誘電率と比例することを利用している。近年比較的安価で使用しやすいため、多くの研究機関で使用され始めているのが平板型のセンサーで、体積含水率の他に電気伝導度や温度測定が可能なタイプも販売されている（ECH₂Oプローブ）。



ECH₂Oプローブ

② 誘電率法

上記同様、物質の比誘電率の違いを利用したもので、TDR法（時間領域反射率測定法）、FDR法（周波数領域反射率測定法）、ADR法（振幅領域反射率測定法）がある。TDR法は、一定周波数の電磁波が土中に埋設したロッドを往復する速度を時間領域で測定し、誘電率を求める方法で、FDR法は連続的な種々の周波数の電磁波が土中のロッドを往復する際に発生する合成干渉波を周波数領域で測定し、そのピーク特性から誘電率を求める方法、ADR法は一定周波数の電磁波が土中のロッドを往復する際に発生する電圧の差を振幅領域で測定し、誘電率を求める方法である。10cm程度のロッド（棒）が2～3本並んで配置されたセンサーが一般的であるが、長さ150cmほどの棒状のプローブにセンサーが所定の位置に数箇所設置されており、土壌の鉛直方向の異なる深さの土壌水分を測定できるものも販売されている。静電容量法よりも高価であるが高精度である。



ADR法プローブ

③ 熱伝導率法

土壌中の水分量とその熱伝導率に土壌特有のほぼ線形の関係があることを利用した方法。発熱体と温度センサーを1本のセンサーの中に組入れ、発熱体に通電し加熱することによる温度変化から熱伝導率を求め、土壌水分に換算する。ヒートプローブ法、双子型ヒートプローブ法、簡易熱伝導率測定法などがある。

る。土の性質により測定値が異なるので、あらかじめ対象土壌毎に室内実験により水分率（含水比）との相関を取る必要がある。測定期間中、センサー周囲の土壌を土壌水分条件の異なる時期に採取し、キャリブレーションに用いると簡便である。

(2) 土壌水分張力

① 圧力変換器つきテンシオメーター

pF測定用に通常使われているテンシオメーターに合成樹脂製の管をつなぎ、その末端に小型・軽量の半導体圧力センサーをつないだもので、pF2.9程度まで測定可能である。最大の問題は管内への水の補給であり、現地ほ場に埋設した場合は、状況によっては頻繁に行う必要がある。電圧ロガーに接続した場合、電圧値から土壌水分張力への変換が必要である（大起理化工業製など）。

② 電気抵抗法

土壌中の水の電気抵抗を利用して土壌水分張力を測定する方法。土の性質や土壌水中のイオン組成の変動により誤差が生じやすい。多孔質ブロックを用いた水分計は、石膏ブロック、ガラスブロック、ファイバーグラスなどがあり、安価である（Watermark土壌水分センサーなど）。

③ 誘電率法

誘電率法を利用した土壌水分張力測定用のセンサーも販売されている（DECAGON MPS-2、イクイテンシオメーターなど）

3) 補足説明

- (1) 土壌水分計は塩分、温度、乾燥密度、センサーと土壌との密着度などに影響されることが指摘されているため、センサー周囲の土壌を採取し、キャリブレーションを行った方が良い。また、測定値に与える影響が大きいので、設置の際はできるだけ土壌を乱さないよう注意する。
- (2) 土壌水分張力測定用のセンサーは、測定可能な圧力の範囲がセンサーの種類ごとに異なるため、確認が必要である。

3. 参考文献・資料

- 1) 土壌標準分析測定法委員会. ”土壌標準分析・測定法”. 博友社, 1986.
- 2) 農業土木学会. ”土の理工学性実験ガイド”. 農業土木学会, 1983.
- 3) 土質工学会. ”土の試験実習書（第一回改訂版）”. 土質工学会, 1984.
- 4) 農林水産省. ”土壌環境基礎調査における土壌・水質及び作物体分析法”. 農林水産省, 1979.
- 5) 土壌物理性測定法委員会. ”土壌物理性測定法”. 養賢堂, 1972.
- 6) 農林省振興局. ”地力保全基本調査における土壌分析法”. 農林省, 1959.
- 7) 中野政詩ら. ”土壌物理環境測定法”. 東京大学出版会, 1995.
- 8) 土壌物理学会編. ”新編土壌物理用語事典”. 養賢堂, 2002.
- 9) 土壌環境分析法編集委員会. ”土壌環境分析法”. 博友社, 1997.

4. 土壌物理性に関する単位についての補足

表3 土壌水分 (pF) に関する各種単位の換算表

pF	水柱 cm	水銀 (Hg) 20°C、cm	bar	SI単位系のPa		気圧
				kPa	Mpa	
1.0	10.0	0.7	0.01	1.0	0.001	
1.5	31.6	2.3	0.03	3.1	0.003	
1.8	63.1	4.7	0.06	6.2	0.006	
2.0	100	7.4	0.10	9.8	0.01	
2.3	200	14.8	0.20	19.6	0.02	
2.5	316	23.3	0.31	31.0	0.03	
2.7	501	37.0	0.19	49.0	0.05	
3.0	1000	73.8	0.98	98.0	0.10	0.968
(3.0)	1020	75.3	1.00	100.0	0.10	0.987
(3.0)	1033	76.3	1.01	101.0	0.10	1.000
3.2	1585	117.0	1.55	155.0	0.16	
3.8	6310	465.8	6.19	619.0	0.62	
4.0	10000	738.2	9.80	980.0	0.98	
4.2	15849	1170.0	15.54	1554.0	1.55	
(4.2)	15300	1129.5	15.00	1500.0	1.50	

注) pF4.2 は 15bar = 1.5MPa に、pF2.5 は 1/3bar = 33kPa にほぼ相当する。
 水銀の20°Cでの比重は 13.5462g/cm³。1気圧 = 1013mbar = 1.013bar = 水柱 1033cm
 pF1.0 = 水柱 10cm = 0.0098bar = 0.98 kPa (1cmH₂O = 98.1Pa)

表4 土壌物理分野でよく使われる物理量の換算係数

量	SI単位	従来単位からの換算式
乾燥密度	kg m ⁻³	1 g cm ⁻³ = 10 ³ kg m ⁻³ = 1 Mg m ⁻³
単位体積重量	N m ⁻³	1 gf cm ⁻³ = 9.81 × 10 ³ N m ⁻³
比表面積	m ² kg ⁻¹	1 m ² g ⁻¹ = 10 ³ m ² kg ⁻¹
圧力, サクシヨン	Pa	1 Pa = 1 N m ⁻² , 1 dyne cm ⁻² = 0.1 Pa 1 bar(バール) = 10 ⁵ Pa, 1cm H ₂ O = 98.1 Pa
水分ポテンシャル	J kg ⁻¹ , J m ⁻³	1 erg g ⁻¹ = 10 ⁻⁴ J kg ⁻¹
表面張力	N m ⁻¹	1 dyne cm ⁻¹ = 10 ⁻³ N m ⁻¹
粘性係数	Pa s	1 P(ポアーズ) = 0.1 Pa s 1 cP(センチポアーズ) = 10 ⁻³ Pa s
透水係数	m s ⁻¹	1 cm s ⁻¹ = 10 ⁻² m s ⁻¹
拡散・分散係数	m ² s ⁻¹	1 cm ² s ⁻¹ = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
比熱	J kg ⁻¹ K ⁻¹	1 cal g ⁻¹ °C ⁻¹ = 4.19 × 10 ³ J kg ⁻¹ K ⁻¹
体積熱容量	J m ⁻³ K ⁻¹	1 cal cm ⁻³ °C ⁻¹ = 4.19 × 10 ⁶ J m ⁻³ K ⁻¹
熱伝導率	W m ⁻¹ K ⁻¹	1 W m ⁻¹ K ⁻¹ = 1 J m ⁻¹ s ⁻¹ K ⁻¹ 1 cal cm ⁻¹ s ⁻¹ °C ⁻¹ = 4.19 × 10 ² W m ⁻¹ K ⁻¹
温度伝導率	m ² s ⁻¹	1 cm ² s ⁻¹ = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
湿潤熱	J kg ⁻¹	1 cal g ⁻¹ = 4.19 × 10 ³ J kg ⁻¹
吸着熱	J mol ⁻¹	1 kcal mol ⁻¹ = 4.19 × 10 ³ J mol ⁻¹