環境土壌学実験

I. 講義の目的

地球の表面は、土壌というわずか数 10 cm から数 m 程度の薄い表皮に覆われています。土壌は、地球全体の大きさから見れば取るに足りない程の薄さでしかありませんが、水を貯え・浄化する力、急激な環境変化を緩衝する力、物質を固定する力など様々な能力を有しています。このため、土壌は動植物の活動の場となり、気候形成にも大きな役割を担っています。我々人類もまた、この土壌の豊かな恩恵を享受し、生活文化を育んできました。

ところが最近では、開発にともなう土壌流失、化学肥料や農薬の河川への流出、家庭や工場からの生活排水による土壌や水質の悪化、それにともなう湖沼の富栄養化など、自然に対する過度の働きかけのために土壌環境そのものがひどく傷みつつあります。こうした状況にある今、地球・地域環境への優しさを兼ね備えた土壌資源の利用、整備、管理のあり方について考える必要があると思います。

実際に我々の周りで起こっている問題は、いろいろな要因が複雑に絡み合い解決が困難な問題ばかりです。また現在、従来までの石油依存型社会から持続型社会への転換が迫られています。こうした中、土壌の果たす役割とは一体何でしょうか？また、私たちができることには何があるのでしょうか？

「環境土壌学実験」では、生物資源の基盤である土や水に実際に触れ、その性質やその中で起こっている現象を科学的に理解することを狙いとします。先ずは感覚的に土や水に触れ、親しんでください。しかし、そこで得られたものをただ感覚的に並べてみても説得力がありません。この感覚を確かなものとするために、科学的にデータをとり、正しい科学の言葉で表現することを学ぶ必要があります。本実験で取り上げるテーマは、現場に比べると単純で基礎的なことばかりかもしれません。しかし、これらの実験を通して、単純な系内の問題でもじっくりと考え、問題に対する具体的な取り組み方を学び、未来を想像するセンスを身に付けて頂きたいと思います。

2002 年 4 月
2018 年 9 月改訂

II. 講義の内容と日程

環境土壌学実験は、5×a, b の 10 班に別れて行います。実験は、以下の日程表に従い行います。それぞれ番号が示す実験について、前もってテキストに目を通し、実験ノートの準備をすると共に、内容を理解しておくこと。なお、FS 実習で行った畑地や水田の土壌の観察とも関連します。

実験番号	実験タイトル	ページ
1	測定器の精度と誤差	7
2	土の三相と土粒子の密度	13
3	土の土性と粒径分布	18
4	土の飽和透水係数	25
5	熱電対の検定	29
6	土の塑性と液性限界	34
7	土の水分保持	37
8	水質の評価	40
9	土中への水の浸潤	44
１０	土の pH と緩衝能	48
１１	土の熱的性質	50
１２	土の還元	53
１３	圃場の断面観測（FS 実習）	55

日程（予定）：

月															
日															
1 班	ガイダンス&1	農場実習	2	3	4	5	6	予備日	7	8	9	10	11	予備日	
2 班			3	4	5	6	2		8	9	10	11	7		
3 班			4	5	6	2	3		9	10	11	7	8		
4 班			5	6	2	3	4		10	11	7	8	9		
5 班			6	2	3	4	5		11	7	8	9	10		

（注 1） 教員の指示に従って、日程を記入して下さい。
（注 2） 「１．測定器の精度と誤差」は初回ガイダンスの後に行います。
（注 3） 農場実習では実験で用いる土壌の採土を行います。採土方法の動画は
土壌圏循環学 HP あるいは https://www.youtube.com/watch?v=7Yo_w9MprR0　で確認できます。
（注 3） 「６．土の塑性と液性限界」の日には「１２．土の還元」のインキュベーションもします。
「１０．土の pH と緩衝能」の日には「１２.」のインキュベーション後の観察も行います。
（注 4） 「１３．圃場の断面調査」は 2 年前期の FS 実習で実施済みとします

III. 講義の方法

・実験の心得と安全の確認

各自、「安全マニュアル」を熟読し実験に望んでください。マニュアル記載事項を守らず以下の事由が生じた場合には、班員全員のレポートを減点します。

１．　不注意により、器具の破損、機器の故障を招いた場合
２．　実験終了時の電源、ガスの元栓の消し忘れ、および清掃不備

・評点

実験終了後、結果をレポートにまとめて提出してください。10 回の実験レポートの総合点（10×10＝100 点）を評点とします。欠席は原則として認めません。

・実験ノート

初回の実験が始まるまでに、各自指定の A4 版（方眼入り）の実験ノートを用意して下さい。各実験（２～１１）の前にはノートに、実験名、実験目的、実験方法などをまとめておき、実験の内容と方法、原理をよく理解しておくように努めてください。実験時には、

（１）　実験タイトル
（２）　実験年月日、時間、天候、共同実験者
　１．実験目的（実験前に既に書かれていれば実験時には書かなくてよい）
　２．測定値（グラフ、表）
　３．実験中に気づいたこと

をノートに明記すること。また、実験終了時にはノートを担当教官（あるいは T.A.）に提示して検査印を受けてください。

・レポート

以下の要領で作成したレポートを、**月曜日正午**までに、土壌圏システム学研究室・渡辺部屋（572 室）へ提出してください。締め切り厳守です。遅れた場合、遅れた日数にあわせてレポート点を減点します。

１．A4 版のレポート用紙あるいはプリントアウト紙を用い、左上をホチキス等で綴じる。
２．**1 枚目は表紙**とし、実験タイトル、**班名**、氏名、提出日を記載する。
３．2 枚目には 200 字程度の**要旨**を記載する。
４．3 枚目以降に実験内容を以下の順に記載する
　実験タイトル、氏名、実験年月日、時間、天候、共同実験者
　① はじめに（目的を数行にまとめる）
　② 実験の原理と方法（箇条書きではなく文章でまとめることが望ましい）。
　③ 実験結果（測定値のグラフ、表、計算）
　④ 考察（実験結果からわかること、推測できること。）
　⑤ 応用、アイデア
　⑥ 課題の答え（図書館等をよく利用してください）
　⑦ 参考文献

５．レポート執筆に関する注意

・ **要旨**については次節「要旨」を参照のこと。

・ **正しい日本語**で書かれているか、提出前によく読み直すこと。句読点の打ち方、誤字脱字、主語述語の関係に気をつけてください。長文は不可です。単文を推奨します。

「…土壌の〇〇は、複雑であり、また、その測定法も、☆☆☆であり、□□□とおもわれる。」などわけのわからない長文、主語述語の関係がめちゃくちゃな文章で書かれたレポートが多く困っています。また「付属農場」「気層」、「個相」「資料」、「飼料」などの誤字をよく見かけます。

・ テキストを写すのではなく**自分の言葉**で書くようにしてください。

「実験方法」などで、自分が行ったはずのことをこれからおこなうかのように書く者、まるで他人事の様に書く者、実際には行っていないことや省略したことまで書く者がいます。注意してください。

・ 「結果」では各グラフや表（測定値）毎に簡潔な説明を記すこと。レポートはノートではありません。**数字の羅列**や**図表の羅列**ではわかりません。図や式で用いた代数や凡例の説明も忘れないように。また、測定値や計算結果には**単位を明記**し、単位系を統一すること。

例：図１に〇〇の結果を示す。
　：△△の結果、図２の様になった。
　→ここで、図中の☆☆は□□である。図より〇〇〇がわかる。次に….

・ グラフは（必要に応じて別紙に）**大きく描く**こと。枠は不要です。また、グラフにはタイトルをつけてください。軸・式・凡例などの書き方、有効数字、代数の説明にも注意を払うこと。

縦軸、横軸、凡例のタイトルを明記すること。手書きのさいはマーカーに「・」は使用せず「×」「＋」など、中心（交点）がわかるマーカーを使用する。

・ **有効数字**については「１．測定器の精度と有効数字」を参照のこと。

・ 計算は**式の羅列にならない**ように適切な説明文を加え、代数の定義や使用した数値も記載すること。

・ 参考文献がある場合、これを記載すること。

著者、タイトル、ページ、出版年号、出版社を明確にすること。インターネット HP からの引用は信用に足るサイトのみ可。この場合は URL と確認日を記載すること。どこの誰かわからない個人のサイトは、たとえ大学教員のサイトであろうと不可。

レポート（報告書）は、他人に見せるものです。実験を知らない他人が読んだとしても、何が書いてあるか理解でき、内容を把握できるように（丁寧に、見やすいものを）工夫することが重要です。ノートではないので、値や式の羅列に留まらないこと。

６．採点基準

１０点を持ち点とし下記の項目について**減点**・加点します。すなわち１０点以上になることも、０点以下になることもあり得ます。レポートが６点に達しないときは、レポートの訂正（**再提出**、再再提出、再再再提出…）を求めます。再提出期限は、レポートを返却されてより１週間以内です。また、レポートが０点以下となった場合は**再実験**となります。

① 要旨
② 全体構成　（構成・日本語は正しいか？参考文献はあるか？見せ方の工夫）
③ 結果　　（結果は正しいか？有効数字、単位、代数の定義は適当か？）
（グラフのタイトル、軸や傾き、グラフからわかることが説明されているか）
④ グラフ・表（タイトルや軸名の有無、大きさ、軸スケールや凡例は適切か？）
⑤ 課題・考察　　（どんどん加点します）
⑥ 提出遅れ・実験態度（どんどん減点します）

・要旨（Abstract）

科学論文には、かならず「要旨」といわれる短い文章がついています。要旨は、本文のミニチュア版であり、手短な文章中に、**目的、方法、結果、考察、結論**が圧縮されたものです。

どんなに立派な論文や報告書でも、誰の目にも触れなければ、社会に貢献することはできません。しかし、各分野で何万という研究論文が発表され、役所や会社内で膨大な報告書（電子文書を含む）が作られている現在、一人の人間が、全ての内容を網羅することは不可能です。（研究を志し、関連分野の研究内容を探しているうちに人生が終ってしまうかも？）

こうした状況の中、内容が圧縮、整理された要旨が非常に重要となります。コンピュータ等による文献検索においても、要旨はタイトルやキーワード同様になくてはならないものです。

環境土壌学実験では、この要旨の書き方を訓練することで、冗長な表現のない、引き締まったレポートの書き方を身に付けてもらいたいと思います。要旨を書くには、まず、以下の項目を**単文**で書き、それらを適切な接続詞でつなぎあわせる事から始めることを薦めます。

１）○○を考える場合○○を知る必要がある。／○○が問題である。（**はじめに**）
２）○○○を**目的**に実験した。／実験の**目的**は○○○である。
３）○○法を用いて○○を測定した。／**方法**は○○○である。
４）その**結果**、○○○○○○がわかった。
５）このことは○○○を意味する／と考えられる。（**考察**）
６）○○○○が問題である。（**結論**）

日本語を正しく（**主語述語の関係**が明瞭で、**誤字脱字**などがないように）書き、**書き終わったら必ず読み直し**てみること。

参考文献

本テキストは 1992 年度版の環境土木学実験テキストを基本、2002 年に資源循環の、2016 年に共生環境の基本理念にあわせて書き改めたものです。単位は SI 単位系とし、実用性に応じて cgs 単位系を併用します。主な参考文献は以下のとおり。

ダニエルヒレル, 環境土壌物理学, 2001, 農林統計協会
土壌物理性測定法委員会編, 土壌物理測定法, 1972, 養賢堂
石原研而, 土質力学, 1988, 丸善
甲藤好郎, 工学技術者のための熱力学, 1994, 養賢堂

木村勇雄, 測定精度と有効数字, 1999, http://irws.eng.niigata-u.ac.jp/~chem/kimura/
Klute A.(ed.), Methods of soil analysis, Pt. 1, American Soc. Agronomy, 1986, 363-375
久保亮五, 長倉三郎,井口洋夫,江沢洋編, 理化学辞典 第 4 版, 1987, 岩波書店
小出昭一郎, 物理学, 1997, 裳華房
国立天文台編, 理科年表, 2002
松中照夫, 土壌学の基礎, 2004, 農村漁村文化協会
宮崎毅, 溝口勝, 関勝寿, 井本博美, 土壌物理環境実験, 2002, http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/ jikken/
日本土壌肥料学会, 土壌環境分析法, 1997, 博友社
農業農村工学会編, 農業農村工学ハンドブック 改訂 7 版, 2010, 農業農村工学会
荘司菊雄, 化学実験マニュアル, 1996, 技報堂出版
綿貫邦彦, 分析化学, 1999, サイエンス社
ウイリアムジュリー,ロバートホートン, 土壌物理学 改訂 6 版, 2006, 築地書館

なお、テキストの最新版、安全マニュアル等は以下のアドレスに公開してあります。必要時応じて活用してください。

実験テキスト	http://www.bio.mie-u.ac.jp/junkan/sec1/lab5/dojyoex.html
生資安全マニュアル	http://www.bio.mie-u.ac.jp/research/safety-ethics/

実験を始める前に

＜危険防止＞

・試薬使用時は白衣とセイフティーグラスを着用すること。
・実験室では実験に適した服装を着用する。
・長い爪、マニキュアは避ける。
・靴は安定したものを履く。サンダル等足の全体を覆えないものは避ける。酸やアルカリが付着することを想定して、高価な靴を履くのは避ける方が賢明である。
・かばん等の持ち物は実験台の下や指定の場所に収納する（実験台の上に置かない)。
・実験室内では飲食や喫煙は厳禁である。
・割れたガラスで大きなけがすることがあるので十分注意する。また、万一けがをした場合には傷口を良く消毒し、化膿を防ぐ。
・やけどをしたらすぐに流水で長時間冷却する.
・皮膚に薬品をつけた場合，ピペットから薬品を誤って口中に吸い上げた場合，あるいは薬品（特にアルカリ）のしぶきが目に入った場合などはまず大量の水で良く洗ってから教官に申し出る.
・危険に遭遇してパニックに陥っている学生は周りの人が助けるよう気を配る.
・ガラス器具等を破損した場合には，必ず報告し破片等を清掃すること.
・ホールピペットを口で吸引して溶液を量り取らないこと（危険)。

＜清潔・節約＞

・実験終了後は、実験台を雑巾でよく拭く。器具は洗浄して次に実験にすぐ使えるようにする。また、機器は実験前の状態に整える。
・実験中に薬品などをこぼしたときには直ちに拭き取る。
・実験の前後には石鹸で手を洗う習慣をつける。
・ガス、電気、水などを無駄遣いしないように気をつける。
・ろ紙や薬包紙を計算やメモに使わない.
・試薬の使用量は必要最小限にする.
・水道水で代替できる実験（水槽の水など）には蒸留水を用いないこと.

１．測定機器の精度と有効数字

（１）はじめに

「量」の測定には、測定機器の精度と測定結果のばらつきからくる曖昧さ・不確かさが必ずともないます。例えば、日常よく使う 1 mm 刻みの物差しで 1/100 mm まで測定することはできません。すなわち、この物差しの精度は 1/100 mm よりもはるかに低いということになります（目分量で測る 1/10 mm の桁も正確とは言えません）。また、同じ量を何回も測定したときには、最も確からしい値として平均値を採用しますが、測定値のばらつきが大きければ平均値の確からしさの度合いも低くなります。

それでは、測定値の曖昧さ・不確かさの程度をどのように数量化したらよいのでしょう？また、測定値をどのように表記したらよいでしょう？そこで本実験では、有効数字と測定値の精度および計算値の精度について学び、ノギス、マイクロメータ、秤を用いて物質の体積、密度を求めます。

（２）有効数字

測定値には常に不確かさがともないますが、このことは測定値の数字すべてが信用できないということではありません。例えば、最小目盛が 0.1 cm で長さが 30 cm（検定済み）の物差しを使って 500 円硬貨の直径を測り、右のような測定値を得たとします。このとき、最も確からしい値としては、平均値の 2.626 cm を採用しますが、問題はこの平均値の数字が、頭から数えて何桁目から信用できなくなるかにあります。

	2.62
	2.63
	2.63
	2.61
	2.64
平均	2.626 cm

まず、物差しのあて方や読み方に 0.1 cm 以上の曖昧さがあることは考えにくいですし、測定結果も少数第 1 位の桁の数値がそろって出ていることに着目します。これらのことから 1 位の桁は無論のこと、少数第 1 位の桁にも不確かさはないと考えられます。一方、少数第 2 位の数値は不確かと考えられます。実際、この桁には目分量の不確かさが含まれていますし、測定結果もこの桁でばらついています。

ここで、小数第 2 位が不確かである以上、小数第 3 位以下を測定の最終結果の報告に記しても意味がないことに注意しましょう。一方、小数第 2 位は、不確かには違いありませんが、完全にでたらめというわけでもありません。実際、この桁の数値が 7 や 8 になる可能性はかなり低いはずです。その意味で、この桁までは有効（significant）なので、頭から数えて最初に不確かさの含まれる桁までの（ゼロでない）数字を**有効数字**、その桁数を**有効桁数**と呼びます。上記の例では、有効数字は 3 桁となります。

[注意]

・2.63 cm = 0.0263 m ですが、右辺の 1 位、および小数第 1 位の 0 は有効数字とは呼びません。

・最終結果に有効数字より下の桁を書いても無意味と述べましたが、計算途中で数字を常に有効数字に丸める（round off）ほうがよいと言っているわけではありません。むしろ丸めによって実際の値との食違いが生じるのを避けるためには、途中の計算は有効数字の次の桁まで残して実行すべきです。但し、この食違いは不確かさが顕れる桁よりも 1 桁小さいので、ひどく気にしなくてはならないほどのものでもありません。

（３）測定値の精度

定規、測容器などを用いた測定では、目盛りの 10 分の 1 まで目測で読みます。

［例１］ 1000 mL のメスシリンダ

最小目盛り 10 mL の場合 1 mL の位まで読む

67 mL と読んだならば、実際には 66.5～67.5 mL = 67 ± 0.5 mL

つまり最小桁の単位の 1/2 倍の誤差が含まれます。

この場合、上から２桁目までが信頼できます。

・・・有効数字２桁

［例２］ 10 mL のメスシリンダ

最小目盛り 1/10 mL の場合 0.01 mL の位まで読む

6.24 mL と読んだならば、実際には 6.235～6.245 mL = 6.24 ± 0.005 mL

つまり、最小桁の単位の 1/2 倍の誤差が含まれます。

この場合、上から３桁目までが信頼できます。

・・・有効数字３桁

［確認］

7.9366 mL の水の容積を

1000 mL のメスシリンダで測定すると 8 mL ・・・有効数字１桁

10 mL のメスシリンダで測定すると 7.94 mL ・・・有効数字３桁

読みが目盛りに一致した場合

10 mL のメスシリンダで 8.00 mL と読んだとき誤差は 0.005 mL

10 mL のメスシリンダで 8 mL と読んだとき誤差は 0.5 mL

8.00 mL と 8 mL とは、数学的には同じですが、物理的には全く異なることに注意。

小数点以下の桁数は有効数字には直接関係ない。

（４）計算値の精度　加減算の場合

次に、得られた測定値を用いて計算を行った際、得られた数値の有効数字をどのように見積もったら良いか考えましょう。

86 mL の水に 37.24 mL の水を加えるとき

86 + 37.24 = 123.24 mL と表示するのは意味がない。

(86 ± 0.5) + (37.24 ± 0.005) = 123.24 ± 0.505

・・・小数第 1 位は信頼できない！

こういった誤差範囲を毎回計算するのは煩雑なので、簡便法を用います。

［簡便法］

加減算の有効数字は最小桁が最も大きい数値の最小桁で決まる。上の計算例の場合、最小桁が 1 の位の数値と小数第 2 位の数値との加算なので有効数字は 1 の位までとなる。

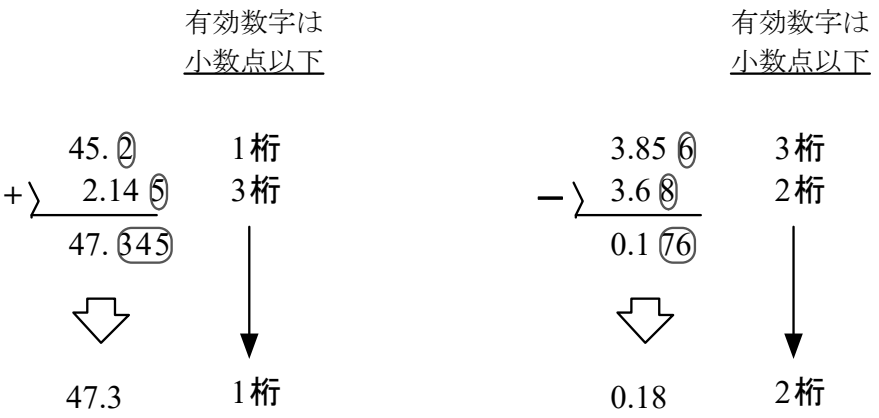
123 mL ・・・有効数字 3 桁

誤差を含まない数値は考慮から除く。ただし、計算途中での丸め操作で誤差が増大するのを防ぐために、有効数字 +1 桁で計算を進め、最終的な答えを示すときに有効数字を合せる。

この場合、計算途中なら 123.2 mL

最終的な答えを示すなら 123 mL

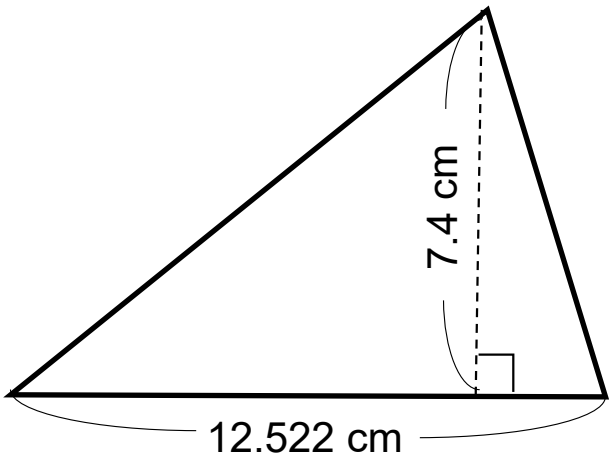
［例３］



加減算の場合は、例３のように、計算結果の有効数字の最低位は、もとの 2 つの値の有効数字の最低位の高いほうと同じになる。また、加減算の場合は、全体の桁数ではなく**小数点以下の桁数**に着目する。

（５）計算値の精度　乗除算の場合

［例４］　三角形の面積



(12.522 × 7.4) / 2 = 46.3314 cm^2 と表示するのは意味がない。
{(12.522 ± 0.0005)×(7.4 ± 0.05)}/2 = 46.3314 ± 0.3149
・・・小数第 1 位は信頼できない！

加減算の場合同様、毎回誤差範囲を計算するのは煩雑なので、簡便法を用いる。

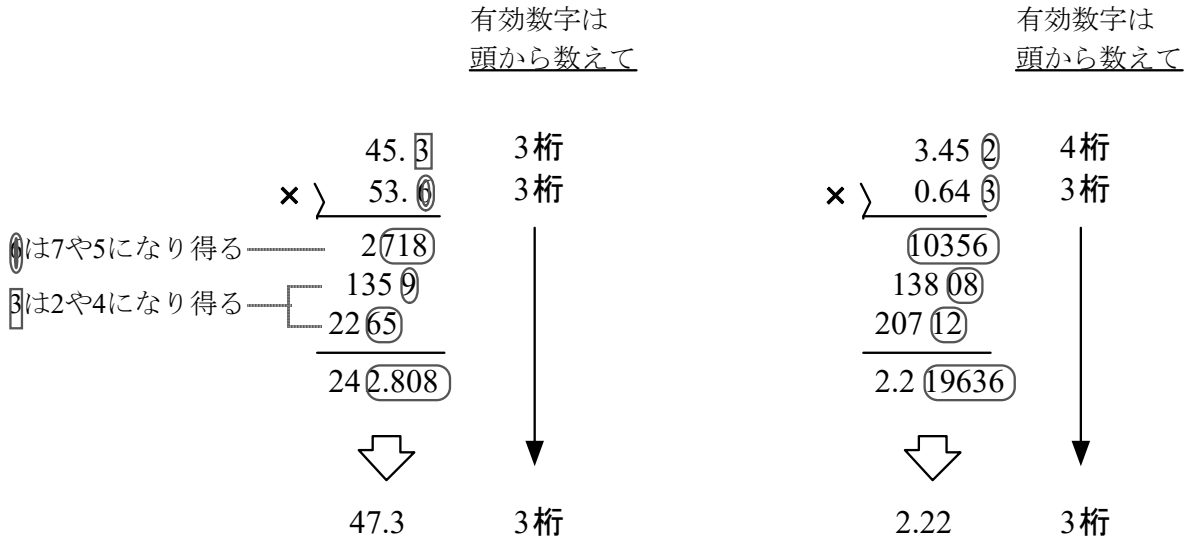
［簡便法］

乗除算の有効数字は桁数が最も少ない数値の桁数になる。この場合、5 桁と 2 桁であるから有効数字 2 桁。誤差を含まない数値は考慮から除く。この場合の除数「2」など。

ただし、計算途中での丸め操作で誤差が増大するのを防ぐため、有効数字 +1 桁で計算を進め、最終的な答えを示すときに有効数字を合せる。

例４の場合、計算途中なら　　46.3 cm^2
最終的な答えを示すなら　　46　cm^2

［例５］



乗除算の場合は、例５のように、計算結果の有効数字はもとの 2 つの数値の有効桁数の小さいほうに等しくなる。また、乗除算の場合は、小数点以下の桁数ではなく、**全体の桁数**に着目する。

特に断らなくても、常に有効数字に留意すること。（理科系の常識）

［注意］

今回扱った有効数字と測定値の精度は、半定量的であり、大雑把な取り扱いである。より定量的な誤差の評価（系統誤差、偶然誤差、標準偏差、etc）については、こうした扱いに慣れた後、各自独習して頂きたいと思います。

（６）円柱の密度の測定

［マイクロメータによる円柱の直径の測定］

1．**図 1-1** の K を左手に持ち、G を右手で左回りに回転して、A と B の間を図のように開ける。
2．共同実験者に円柱を持ってもらい、A と B の間に入れ、今度は G を右回りに回転して A,B を円柱の直径に近づける。
3．H をゆっくり右周りに回転して円柱の直径を挟み込み、カチッと 1 回音がしたら目盛り D を読む。D の目盛りにより、ミリメートル単位の直径を求める。
4．次に F の目盛りを読む。F には 1/100 ミリメートル単位の目盛りが刻んであるが、目分量により更に 1/1000 ミリメートル単位までよみ、測定値 x_A を求める。（F は 50 目盛りしかないが、2 回の回転により、D の 1 目盛りを移動するようになっている。何回転目かは目盛り D の中間を刻んである目盛り E により判断できる）。
5．G を左回りに回転して円柱を外し、続いて G を右回りに回転して A と B を近づける。最後に H をゆっくり右回りに回転させて A と B をくっつけ、カチッと 1 回音がした所でマイクロメータの零点 x_{0A} を読み取る。
6．上記の測定を交互に 5 回繰り返し、測定値および零点の平均値$\langle x_A \rangle$および$\langle x_{0A} \rangle$を計算し、その差を円柱の直径の最確値$\langle 2R \rangle$とする。

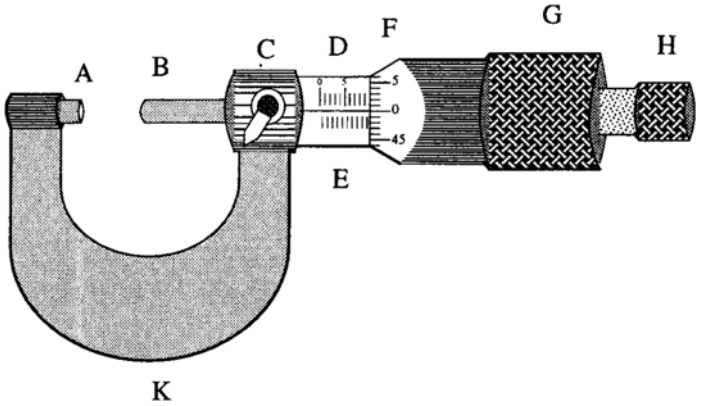


図 1-1　マイクロメータ

[ノギスによる円柱の高さの測定]

1．主尺部分を手に持ち、副尺部分をスライドさせて、**図 1-2** の A のように「ジョウ」の間を開ける。
2．共同実験者持ってもらっている円柱の高さを「ジョウ」間に入れ、もう一度副尺部分をスライドさせて「ジョウ」間に円柱の高さを挟み込む。（挟み込んだら、副尺の背のねじで固定する）
3．副尺（バーニア）の零点の所で主尺（本尺）の目盛りを読み、ミリメートル単位の高さを求める。
4．主尺（本尺）の目盛りと丁度一致している副尺（バーニア）の目盛りをよみ、1/20 ミリメートル単位の測定値 x_B を求める。（副尺の目盛りの所についている「数字」を参考にして読む。例えば「3」の目盛りの所で一致していたら.30mm、「7」「8」の中間に刻まれた目盛りの所で一致していたら、.75mm という具合。測定値の**小数第 2 位の数字は 0 か 5 に限られる**ことに注意すること。）
5．円柱を外して A と B をくっつけ、ノギスの零点 x_{0B} を読み取る。
6．上記の測定を交互に 3 回繰り返して、測定値および零点の平均値$\langle x_B \rangle$および$\langle x_{0B} \rangle$を計算し、その差を円柱の高さの最確値$\langle h \rangle$とする。

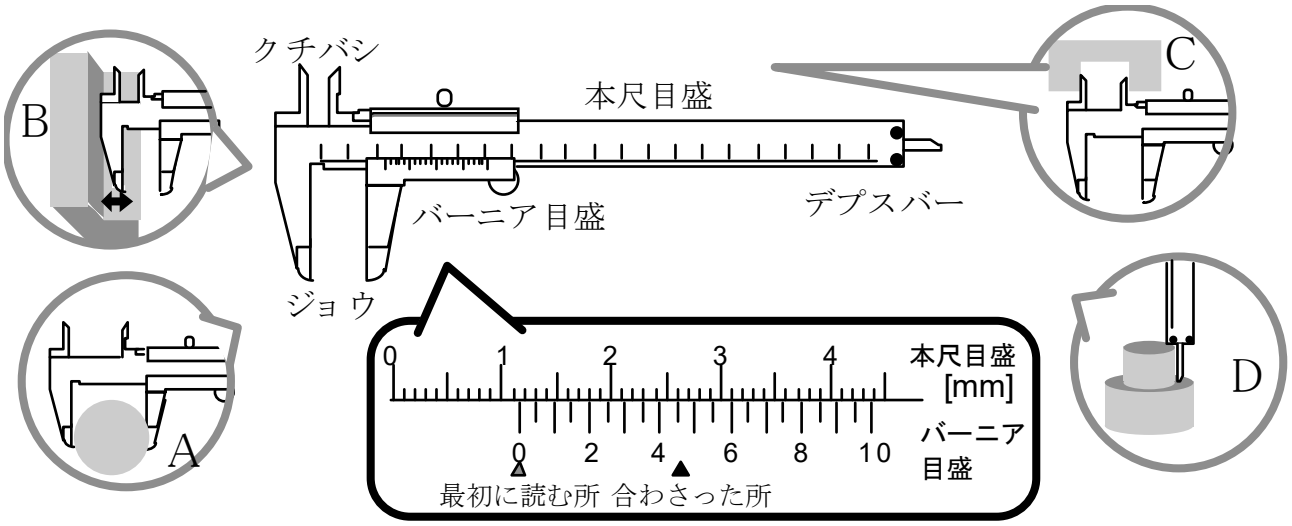


図 1-2　ノギスの各部名称と副尺の読み方

ノギスは 1/20 mm の精度（あるいは 1/100）で物の幅や長さを測る精密測定器です。図のように A:外側測定、B: 段差測定、C: 内側測定 D: 深さ測定と様々な長さが測定できます。ノギスの目盛は、まずバーニア目盛の 0 の所の本尺目盛を読みます。図の場合、11 と 12 mm の間ですので、11 mm です。次にバーニア目盛と本尺目盛の合わさった所の目盛を読みます。バーニア目盛は 1 目盛りが 0.05 mm なので、図では 0.45 mm です。これらを合わせたものが測定値であり、図の場合、11.45 mm となります。

ノギスは壊れやすく精密な測定器です。落としたり、ぶつけたり、ハンマーやキリなどの工具の代わりに用いないよう大切に扱ってください。なお、ノギスのクチバシやジョウを、測定物に直角にあてるのがコツです。

[補足：副尺の原理]

副尺（バーニア）とは、スケールをあまり細かく刻むと目盛りが読みにくくなるため、刻みは場を変えたもう 1 つのスケールを併用することで測定器の精度をあげる方法です。ノギス、マイクロメータに限らず、顕微鏡や測量機器、光学機器のステージなどで広く用いられます。

副尺には**前読式**と**後読式**の 2 通りがあります。例えば、主尺の最小目盛りの *n–1* 目盛り分を *n* 等分した副尺を付けたものは前者、*n+1* 目盛りを *n* 等分した副尺を付けたものは後者であり、ともに主尺の最小目盛りの 1/n まで読み取れます。

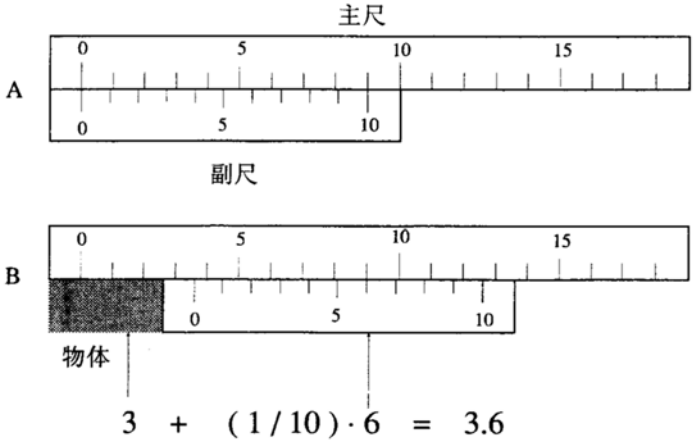


図 1-3　副尺の読み方

ここで、最小目盛りεの主尺の *n–1* 目盛りを *n* 等分した副尺をつけた前読式の場合について、その精度が *1/n* になる理由を考えてみましょう。この場合、副尺の 1 目盛りの長さは $\varepsilon(n-1)/n$ で、主尺 1 目盛りの長さの差は、$\varepsilon - \varepsilon(n-1)/n = \varepsilon/n$ となります。

図 1-3 の A は、主尺の小目盛り 9 をとって 10 等分した精度 1/10 の前読式副尺を示し、B はこれを用いて物体の長さを測定する場合を示しています。主尺の目盛りとちょうど一致している副尺の目盛り（この場合は 6 目盛り目）に副尺の精度 1/10 をかけたものが、副尺の零点のところで読まれる主尺の目盛りの 3 に加算されるべき長さとなるのがわかります。

[ハカリによる円柱の重さの測定]

1．ハカリの電源が入っているか確認する。（電子天秤は安定して使用できるようになるまで電源投入後 30 分程度を要する。）
2．零点があっているか確認する。（あっていない場合は合わせる。）
3．円柱の重さを測定する。（ハカリには、対象の重さに適したハカリ、適したスケールがあるので注意すること。）

[メモ]

２．土の三相と土粒子の密度

（１）はじめに

土壌は驚くほど多様であり、その種類も沢山あります。ほんのわずか歩いてみるだけで、全く違う土壌に出会うことも珍しくはありません。物質循環や生物生産活動を考える場合、基盤である土壌は常に重要な役割を担うことでしょう。しかし、この多種多様な土壌を特徴づける物理的性質や化学的性質とは一体何なのでしょう？また、うまく表現するにはどうしたらよいのでしょうか？先ず始めに、こうした土壌の物理性について知っておく必要がありそうです。

土壌の物理性というと、重さ、大きさ、色、硬さなどが思い浮かぶことでしょう。しかし、同じ土壌でも水分量が違えば重さも異なります。そもそも、土の様な粉体の大きさとは何でしょう？本実験ではこうした土壌の大きさを示すものとして、土壌の乾燥密度（soil dry bulk density）と土粒子の密度（soil particle density）を測定します。土壌の乾燥密度の測定にはいくつかの方法がありますが（例えば Klute, 1986）、ここでは定容積サンプラー法を用います。また、土粒子密度の測定は、JIS 規格に定められた比重測定法（Pycnometer 法）を用います。

（２）土壌３相

土壌は、固相（solid phase）、液相（liquid phase）、気相（vapor）からなる物質であり、**図 2-1** のように模式的に表せます。一般に、体積を V、重量を W で表し、固相（土粒子）、液相（水）、気相（空気）は添え字 s, l（あるいは w）, a で示します。また間隙（空隙, void）については v を添え字に用います。

全容積	V_T	自然状態のままで採土された土壌の全容積量のこと。
実容積	V	土壌の全容積中にしめる、固相と液相の容積の和。
全重量	W	実容積に対応する重量。固相と液相の重量の和。
固相容積	V_s	土壌の全容積中にしめる固相の容積。
固相率	S_v	全容積に対する固相容積の百分率。$V_S/V_T \times 100$
固相重量	W_s	固相の重量。
水分容積	V_l	土壌の全容積中にしめる液相の容積。
水分率（液相率）	S_l	全容積に対する液相容積の百分率。$V_l/V_T \times 100$
水分重量	W_l	液相の重量。
空気容積	V_a	土壌の全容積中にしめる気相の容積。
空気率（気相率）	S_a	気相容積の全容積に対する百分率。$V_a/V_T \times 100$
全空隙（全間隙）	V_v	土壌の全容積中にしめる、液相と気相の容積の和。
間隙率	N	全容積に対する全空隙 V_v の百分率。
飽和度	S_r	全空隙に対する水分容積の百分率。$V_l/V_v \times 100$
容気度	U	全空隙に対する空気容積の百分率。$V_a/V_v \times 100$

これらの値から、以下のような土壌の物理量が定義されます。

間隙比	e	固相容積に対する全空隙の割合。V_v/V_s
体積含水率	θ	全容積に対する水分容積の百分率。$V_l/V_t \times 100$
（重量）含水比	W	固相の重量に対する液相の重量。W_l/W_s
湿潤密度	ρ	W_t/V_T
乾燥密度	ρ_b	固相の重量を全容積で割ったもの。W_s/V_T
土粒子の単位重量	ρ_s	W_s/V_s
土粒子の比重	G_s	土粒子の単位重量を水の単位重量で除したもの。ρ_s/ρ_w

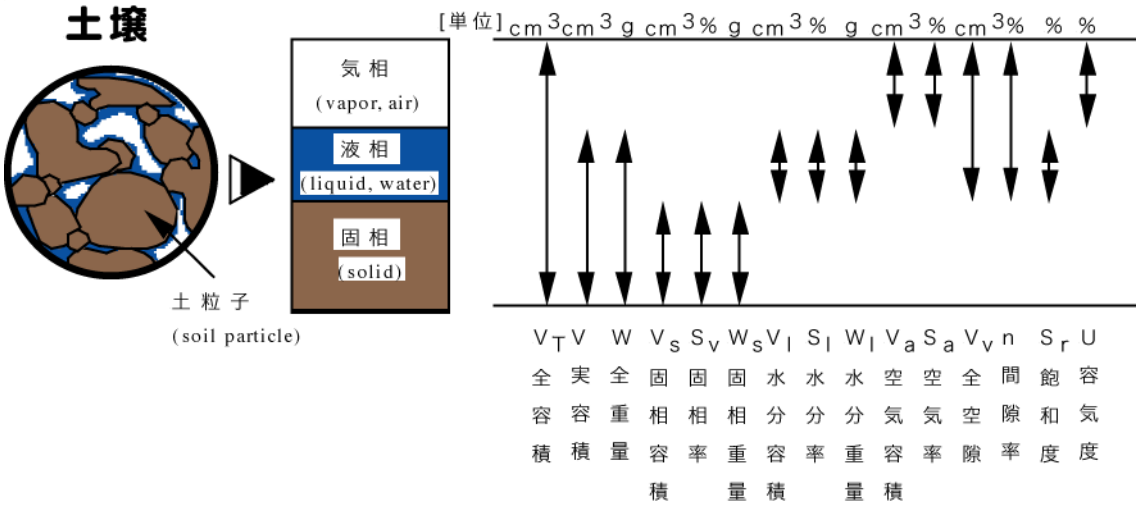


図 2-1　土壌の模式図と用語

前ページで定義した土壌の物理量のいくつかは互いに関係しています。一度、各自整理しておくとよいでしょう。なお、一般的な土壌の乾燥密度は 1.2～1.8 g/cm^3、土粒子の密度（単位体積重量）は 2.65±0.1 g/cm^3 程度と言われています。

（３）土壌の乾燥密度の測定

乾燥密度（ρ_b）は土粒子の質量を土壌（土粒子＋水＋空気）の体積で割った値です。土壌の体積は、現地の土壌構造をできるだけ壊さないようにして採取したサンプラーの容積（100 cm^3）とします。また、土粒子の質量は、採取した土を炉乾燥（105℃、24 時間）した後の重量から求めます。

準備するもの

100 cm^3 サンプラー	上下蓋つきのもの	3 組
蒸発皿（比重試験の試料採取用）		3 個
サンプラー補助器（採土時）		1 個（2 班共同）
土壌ナイフ	（採土時）	1 個
シャベル	（採土時）	1 個
スコップ	（採土時）	1 個（2 班共同）
乾燥炉	105℃で 24 時間測定できるもの	実験室内共用

実験手順

1．農場で採土した試料を用います。三相分布測定用のサンプラー（採土缶）と、比重測定用の土壌をそれぞれ確認して下さい。農場で採土が出来なかった場合は TA の指示に従って下さい。
2．サンプラー表面に着いた土壌等を拭き取り、重量を量る（ビニルテープもはがします）。
3．片方の蓋を開け、24 時間炉乾燥する。

◇◇◇　　◇◇◇　　◇◇◇

4．24 時間炉乾燥後、蓋をして室温にならし、再度重量を量る（翌日昼休み）。
5．乾燥土は次回の実験「３．土の土性と粒径分布」で用いるので、ナイロン袋（班名を書く）にまとめて風乾しておく。
6．サンプラーをよく洗って乾かし、サンプラー（蓋を含む）の空重量を測定する。

計算と結果

1．測定値を用いて、各地点の含水比、含水率、乾燥密度を求める。
2．これまでの各班のデータをあわせて、含水率、乾燥密度の平均値、分散、標準偏差を求める。
3．次ページの（4）の結果も用いて間隙率、飽和度を求める。
4．固相率、液相率、気相率をそれぞれ求め、**図 2-2** のような三相分布図を作製する。

課題

1．ρ_b の計算において、炉乾燥重量の代わりに含水比 2%の風乾土の重量を用いた場合の誤差はどれだけか？
2．ρ_b を求める際、サンプラー内に土壌構造に寄らない 1 cm^3 の空間ができた場合の誤差はどれだけか？
3．別の深さから試料を採った場合、ρ_b の値にはどのような傾向が現れると考えられるか？
4．ρ_b の平均値の標準偏差を 1/10 にするには、サンプル数をいくつにしなければならないか？
5．乾燥密度を測定する方法として、他にどのような方法があるか調べよ。

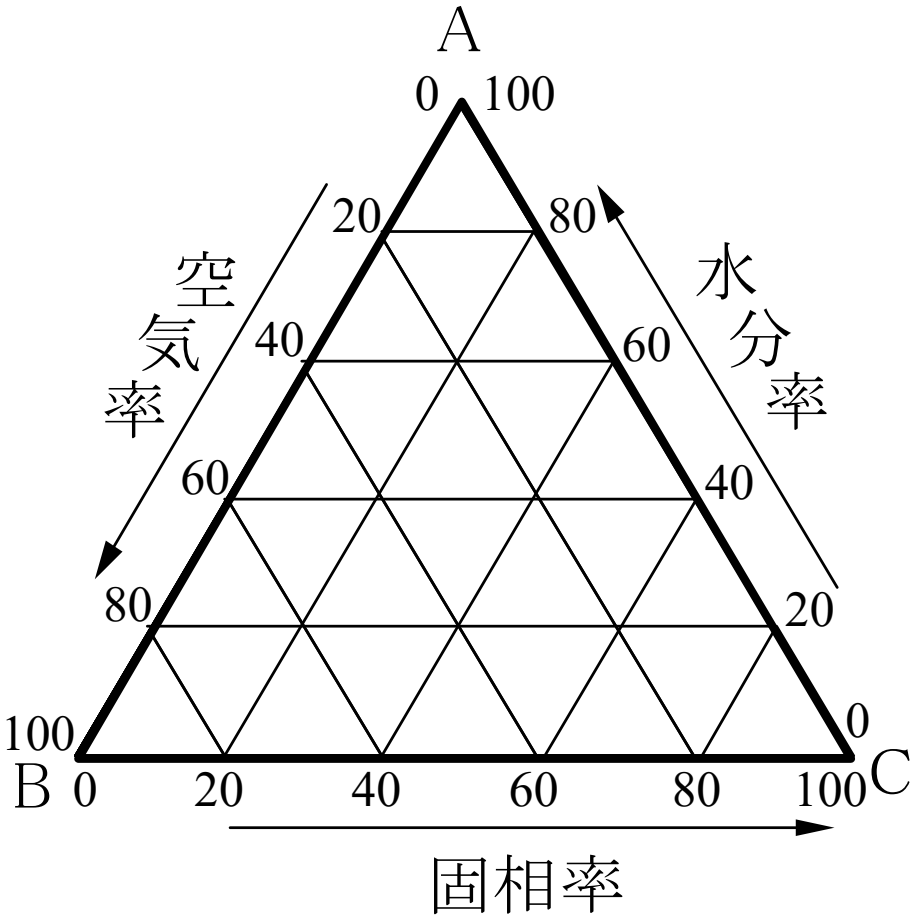


図 2-2　三角座標による相表示

レポート作成時に原図が必要な場合、以下のアドレスからダウンロードし、利用してください。
http://www.bio.mie-u.ac.jp/junkan/sec1/lab5/dojyoex.html

（４）土粒子の比重の測定

土粒子の比重は比重ビン（pycnometer）を用いて求めます。この方法は日本工業規格（JIS A1202）によるものです。

準備するもの

比重ビン	容量 100 mL 以上の容積測定用フラスコ、または 容量 50 mL 以上のストッパー付き測定ビンで ストッパー中心に小孔のあるもの（今年は後者を使用）。	3 個
温度計	比重ビンに付随	3 本
砂皿		1 個
ハカリ	感度 0.001 g のもの	実験室内共用
ガスバーナー		実験室内共用
乾燥炉		実験室内共用

実験手順

＜比重ビンの検定＞

１．比重ビンの重量 W_f を量る。（汚れている場合は洗って乾かしてから）
　比重ビン、温度計、キャップに記されている番号（薄くて見にくい）をあわせること

２．比重ビンに蒸留水を満たし、その全重量 W_a’と水温 T’を量る。（外面の水分は拭き取る）

３．任意の温度 T に対する W_a を次式より求める。

$$W_a = \frac{T\text{ における水の密度}}{T'\text{ における水の密度}} \times \left(W_a' - W_f\right) + W_f \qquad ①$$

＜測定＞

１．試料を用意する。
　自然のままでも、炉乾燥したものでもよいが、容積測定用フラスコを用いるときは乾燥重量 25g 以上、ストッパー付きビンを用いるときは 10g 以上用意する。
　粗い秤で目安をつけること。また、根と石をとりのぞくこと。
　自然のまま、あるいは湿潤な試料の場合、測定終了後、炉乾燥によって重量 W_s を求める。

２．比重ビンの重量 W_f を量る（検定時に測定済み）。

３．試料を比重ビンに入れ、全重量 W を量る（W の測定は湿潤土の時は不要）。

４．蒸留水をフラスコなら 3/4、ストッパー付きビンなら 1/2 くらい迄入れる。

５．比重ビンの中の気泡を取り除く。
　気圧を 0.13 atm （13.3 kPa）以下に下げるか、沸騰してから 10 分以上砂皿の上で静かに煮る。時々比重ビンを振って気泡の抜けるのを助けるとよい。気圧を急に下げると、内容物が激しく沸きこぼれることがあるので注意すること。加熱した試料は室温に下がるまで放置する。
（試料中の空気をいかに残さないかが、実験の鍵です。土が粘土質であるほど気泡が残りやすいので注意すること）

６．比重ビンに、蒸留水をストッパーの小孔の口まで一杯に満たし、外面を洗って乾いた布で水分を拭き取ってから、全重量 W_b と温度 T をはかる
（湿潤土の場合、内容物全量を蒸発皿に移し炉乾燥後、土粒子の質量 W_s を量る：先に蒸発皿の重量を量っておくこと）

計算と結果

ある温度 T における、水に対する土粒子の比重は次式から求める。

$$G_s(T°C) = \frac{W - W_f}{(W - W_f) + (W_a - W_b)} = \frac{W_s}{W_s + (W_a - W_b)} \qquad ②$$

ここで、

G_s ：温度 T の水に対する温度 T の土粒子の比重
W ：炉乾した試料と比重ビンの質量(g)
W_s ：炉乾した試料の質量(g)
W_a ：温度 T における水を満たした比重ビンの質量（式①より）
W_b ：温度 T における水と土粒子を満たした比重ビンの質量(g)
T ：W_b 測定時の温度

・特に指定が無いときは 15℃の水に対する値を次式より求める。

$$G_s(15°C) = K \times G_s(T°C) \qquad ③$$

K ：補正係数（表 1-1：温度 T の水の密度を 15℃の水の密度で割った値）

表 1-1　4～30℃における水の密度(g/cm³)と補正係数 K

℃	水の密度	K	℃	水の密度	K	℃	水の密度	K
4	1.000000	1.0009	13	0.999406	1.0003	22	0.997800	0.9987
5	0.999992	09	14	278	01	23	568	84
6	968	08	15	129	1.0000	24	327	82
7	930	08	16	0.998972	0.9998	25	075	79
8	877	07	17	804	97	26	0.996814	77
9	809	07	18	625	95	27	544	74
10	728	06	19	435	93	28	264	71
11	634	05	20	234	91	29	0.995976	68
12	526	04	21	022	89	30	678	65

課題

1．今回用いた土壌の、4℃の水に対する比重はいくらか？
2．土粒子の密度ρ_sの平均値、分散、および標準偏差を求めよ。この標準偏差と乾燥密度の標準偏差を比べると何が言えるか？
3．比重ビンの中で土粒子と水を煮るのはなぜか？
4．本実験手順は、微細な粘土や有機物が多量に存在する土壌ではうまくいかない。なぜか？
5．自然界で土粒子密度が密接に関連する現象の例を 2、3 挙げよ。
（乾燥密度に関連する現象ではありませんよ）

３．土の土性と粒径分布

（１）はじめに

土壌を手に取って見てみると、様々な形、色、大きさの土粒子があることに気づくことでしょう。こうした土粒子の大きさと散らばり（粒度、あるいは粒径組成）は土壌の基本的性質の一つであり、土壌分類においても重要な因子の一つです。また、土壌の粒度は、土壌の硬さ、圧密性などの土壌の物理性、粘土の集積や溶脱などの土壌生成過程、塩基置換容量や粘土鉱物の種類などの化学性とも密接な関係があり、測定が求められることがあります。

土壌のような複雑で不均一な粉体を扱う場合、その粒子を一つ一つ定規で測り、平均をとっても意味はありません。それでは一体どうしたら粒度を測れるのでしょう？本実験では、比重計（hydro meter）とフルイを用いて土の粒度（particle distribution）を求めます。比重計法による土の粒度分析は日本工業規格（JIS A1204）によるものです。

（２）測定の原理

様々な大きさの土粒子が一様に水中に懸濁している場合、この懸濁液の密度ρ_iは

$$\rho_i = \frac{W_s}{V} + \left(\rho_w - \frac{W_s}{G_s V} \right) \qquad ①$$

で示される。ここで、

ρ_i　：懸濁液の密度　　V　：懸濁液の容積　　ρ_w　：水の密度

W_s　：土粒子の重量　　G_s　：土粒子の比重

いま、1 cm^3 の箱をこの懸濁液の中につけたとすると、この箱の受ける浮力はρ_iに等しくなります。また、この浮力は、全ての土粒子が一様に分布していれば、深さには依存しません。ここで懸濁液を放置して土粒子を沈降させると、大きい粒子ほど速く落下します。つまり、最初**図 3-1a** の様に分布していた粒子 A, B, C は t 秒後には**図 3-1b** のようになるわけです。このとき（t 秒後）、深さ Z より上には、A よりも大きな粒子は存在しません。

ここで、Stokes の法則

$$d = \sqrt{\frac{Z}{Ct}} \qquad ②$$

より A の粒子の直径 d は Z と t から求められます。但し、C は水温によって決まる定数です。
いま、d より小さな粒子の重量と土全体の重量の比を N とすると、t 秒後、深さ Z の懸濁液の密度ρは、

$$\rho = \frac{\mathrm{N}W_s}{V} + \left(\rho_w - \frac{\mathrm{N}W_s}{G_s V} \right) \qquad ③$$

$$\mathrm{N} = \frac{G_s}{G_s - 1} \frac{V}{W_s} \left(\rho - \rho_w \right) \qquad ④$$

と表せます。従って、ある深さで懸濁液の密度を測定すれば、深さと時間から粒径 d が求まり、また懸濁液の比重から d 以下の粒子の割合が求められます。

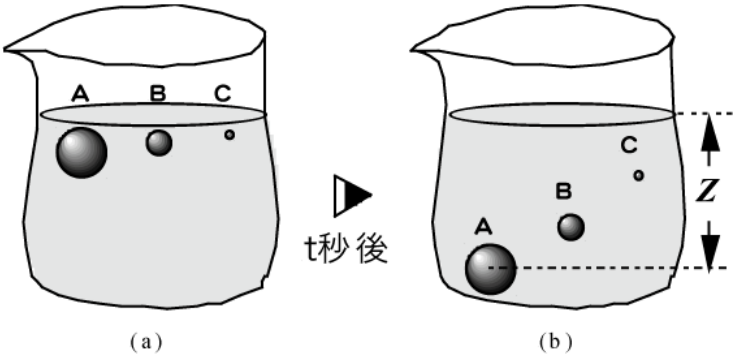


図 3-1 土粒子の沈降

（３）比重計の原理

図 3-2（左）のような比重計をある液体に浮かせ、柄の部分の目盛りを液面で読めば、その液体の比重が測定できます。これを式で表すと

$$r = \rho / \rho_c \qquad ⑤$$

ここで、r は比重計の読み、ρは液体の密度、ρ_cは比重計の校正温度における水の密度です。ただし、JIS ではρ_cを 15℃の水の密度と規定しているので、それ以外の温度で比重計を用いる場合は補正が必要となります。

比重計を液中に浮かべると、比重計の重量 W_H と浮力が釣合い、次式が成り立ちます。

$$\int \rho A dz = W_H \qquad ⑥$$

ここで A は深さ Z における比重計の断面積です。粒子の沈降中、r は Z の関数となります。**図 3-2** は t 秒後の r の様子を示したものです。このときの比重計の読みは、一種の平均値であり比重計のどこかの深さの比重に等しいはずです。しかし比重を示す位置がわからなければ粒径は求まりません。そこで、r と Z 関係式が必要となりますが、これは粒子の配合によって決まるものなので常に同じ関数形とはなりません。そこで Casagrande は、次のように比重計のどこかの深さを求めました。

まず、r と Z は直線関係であると仮定します。

$$r = C_1 + C_2 Z \qquad ⑦$$

比重計の示す比重が深さ Z_r の比重とすると、その位置の密度ρ_rは⑤より

$$\rho_r = r\rho_c = (C_1 + C_2 Z_r)\rho_c \qquad ⑧$$

ここで、式⑦⑧を式⑥に代入

$$(C_1 + C_2 Z_r)\int A dz = \int (C_1 + C_2 Z) A dz$$

$$Z_r = \int AZ dz \Big/ \int A dz \qquad ⑨$$

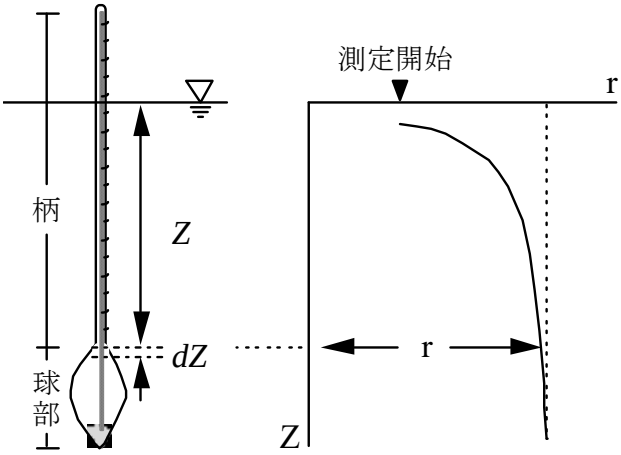


図 3-2　t 秒後の比重計の読み r と深さ Z の関係

これは、すなわち重心を示すものであり、どこかの深さは比重計水中部の浮心ということになります。比重計は、球部（菱形の部分）に比べ柄の部分の体積が小さい上に、球部は上下対称です。そこで、Z_rは球部の中心と考えて実用上問題はありません。

（４）土壌の粒度測定（粒度分析）

準備するもの

ハカリ	感度 0.01g のもの	実験室内共用
分散装置	攪拌翼を備えた攪拌装置と分散容器	1 組
比重計	0.995～1.050 の範囲に目盛りが有り、 15℃の水中で 1.000 の読みを示すもの	1 個
メスシリンダ	容量 1000 mL（高さ 50cm 内径 6cm 程度）	1 個
温度計	精度 1℃のもの	1 本
ノギス		1 本
ストップウォッチ		1 個
蒸発皿		2 個
フルイ	標準網フルイ（JIS 第 408 号標準網フルイ フルイ目：4.8, 2, 0.85, 0.40, 0.25, 0.11, 0.075(mm)	1 組
ビーカー	容量 500 mL のもの	1 個
恒温水槽	懸濁液を振動を与えず定温に保てるもの	1 個（2 班共同）

実験手順

＜試料の用意＞

１．風乾した試料（前回ナイロン袋等に入れておいた土）を乳鉢ですりつぶす。

２．試料の 30g 程度をとり、含水比 [1)]を測定する。

３．残りの試料を標準網フルイ（2 mm, 4.8 mm）でふるい、通過試料の重量を測定する。
根などは取り除く。砂質土なら約 150 g、粘土質土なら約 90 g 程度が望ましい。

４．4.8 mm および、2 mm フルイに残った試料を炉乾燥し重量をはかる。

＜比重計定数の決定＞

１．比重計の球部をメスシリンダ中の水に浸し、その体積 V_B を測る。

２．ノギス [2)]で、球部の長さ L_2[3)]と沈降実験で用いるメスシリンダの断面積を測る。

３．ノギスで、比重計の球部上端から次の目盛りまでの長さを測る。

1.000　1.015　1.035　1.050

４．比重計を清水に浸し、メニスカス上下端の比重計の値を読み、差を取る（メニスカス補正 [4)]）。
土の懸濁水はにごっており、比重計の値が読みにくい。そこで、メニスカス上端の比重計の値にメニスカス補正を加え、比重計の読み値とする。

＜細粒土分析：比重計試験＞

１．2 mm フルイを通過した試料の重量をはかり、以下のいずれかの方法で試料を分散させる。

◇塑性指数 [5)]が 20 以下のとき（本実験ではこちらの方法を使用）

試料をビーカーに入れる。
試料が完全に浸るまで（200 mL 以上）蒸留水を静かに加えながらかき混ぜる。
18 時間以上放置した後分散容器に注ぎ、容器上端より 10cm まで蒸留水を加える。
試料の綿毛化を防ぐためケイ酸ナトリウム結晶（$Na_2SiO_3 9H_2O$）溶液を 20 mL 加える。
こうしてできた溶液の比重は 15℃において 1.023 とする。
（なお、ケイ酸ナトリウム結晶が得られない場合は 1 規定の苛性ソーダ 10 mL とする）
容器の内容物を攪拌装置で約 1 分間かきまぜる。

◇塑性指数 [5)]が 20 以上のとき

試料をビーカーに入れる。
試料が完全に浸るまで 100 mL の 6%過酸化水溶液を静かに加えながらかき混ぜる。
時計皿でビーカーの蓋をし、105℃の炉に入れる。
1 時間後炉から取りだし、100 mL の蒸留水を加え 18 時間以上放置する
これを分散容器に移し、前述の方法同様に分散させる。

２．分散後、分散容器の内容物をメスシリンダに移し、恒温水槽と同じ温度の蒸留水を全体が 1000 mL になるまで加える。
３．メスシリンダを恒温水槽に入れ、水槽および懸濁液の温度を測定し、それぞれが等しくなるまで待つ。この間、ガラス棒で懸濁液をかきまわし、浮遊している粒子の沈降を妨げること。
４．メスシリンダを水槽からとりだし、メスシリンダの口をゴム栓でしっかり密閉し、約 1 分間十分に震盪する。

<<注意！！震盪終了後、すぐに計測を始めます。>>

５．震盪終了刻を記録し、シリンダを水槽中におく。
６．震盪終了後、1[6], 2[6], 5, 30, 60, 240[7], 1440[7]分後の比重計の値を読む。
このとき、比重計はメニスカス上端で 0.0005 まで読み、メニスカス補正をおこなうこと。また、同時に恒温水槽にいれた温度計の読みもとる。
比重計試験中は、水槽やメスシリンダを揺らさないこと。また、比重計の肩に粒子が積もり、比重計の読みにエラーが出ることがあります。肩に積もった粒子を払い落とすように心がけてください（ただし、不用意に振らないこと）。

◇◇◇　　◇◇◇　　◇◇◇

７．1440 分後の比重計の値を読み終わった後、メスシリンダ内容物を 0.075 フルイの上で水洗する。
８．フルイに残った試料を蒸発皿に集め、炉乾燥する。

◇◇◇　　◇◇◇　　◇◇◇

９．乾燥した試料をフルイ（0.85，0.40，0.24，0.11，0.075）で分け、各試料の重量をはかる。

[注意]

1) 含水比は「２．土の三相と土粒子の密度」の手順を参考に蒸発皿を使って測定する。
2) ノギスは「１．測定精度と有効数字」の使い方を確認すること。
3) 球部の長さ L_2 は、V_B 測定時にメスシリンダに浸した長さと等しいこと。
4) 液体が別の物質と接するとき、液面は**図 3-3** の様に屈曲します。これをメニスカスといいます。目盛は本来メニスカス下端の液面で読まなくてはなりません。しかし、泥水のような懸濁液では下端の目盛を読み取るのは容易ではありません。そこで、先に清水中でメニスカス上端と下端の値の差を読んでおきます。ここで、この差が 0.0006 であり、懸濁水のメニスカス上端の値が 0.0152 だったとすると、求める目盛りの値（下端の値）は 0.0152 + 0.0006 =0.0158 となります。

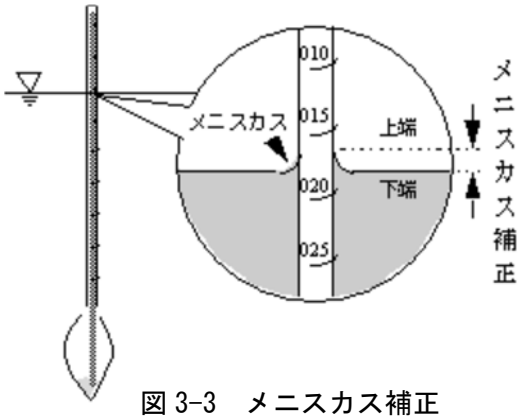


図 3-3　メニスカス補正

5) 塑性指数については「４．土の塑性と液性限界」を参考にしてください。
6) 水槽にメスシリンダを戻すのが間に合わないようであれば、メスシリンダを水槽に戻すのは 1 分後、あるいは 2 分後の測定終了後でよい。
7) 240 分後、1440 分後の測定については、担当の TA、教官に相談すること。

計算と結果

1．2 mm フルイを通過した試料の炉乾重量を⑩式より求め、2 mm 以上のフルイに残った試料の炉乾重量と加算して、全試料の炉乾重量とする。

炉乾重量 ＝ 風乾重量 ×100／（100＋ 風乾試料の含水比(%)） ⑩

2．4.8 及び 2 mm フルイに残った試料の全炉乾燥重量に対する百分率を求める。

3．比重計の有効深さ L を⑪式より求める。

$$L=\left(L_1+\frac{L_2}{2}\right)-\frac{1}{2}\frac{V_B}{A} \qquad ⑪$$

ここで、

L_1：比重計球部上端より目盛を読んだ点までの距離
L_2：比重計球部の全長
V_B：比重計球部の容積
A ：メスシリンダの断面積

比重計の読取り値毎に、L の正しい値を求めること。「**実験手順**＜比重計定数の決定＞３．」で測定した値をもとに**図 3-4(B)**のような検量式を作成し、式から L を求める。

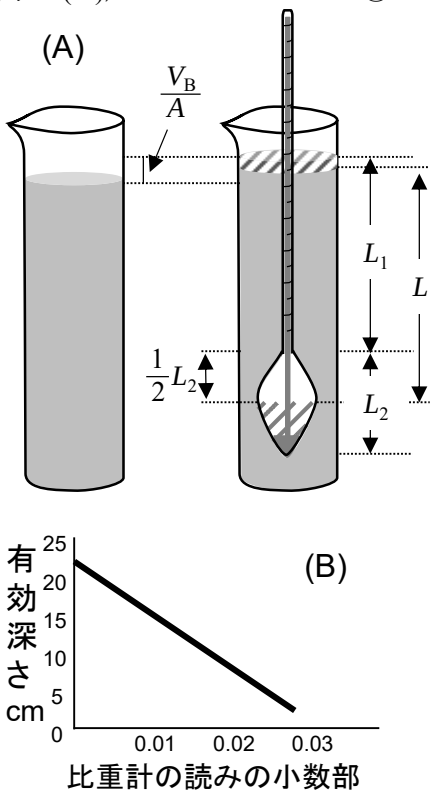


図 3-4　比重計の有効深さ L

4．懸濁している粒子の最大直径を Stokes 則（式⑫）より求める。

$$d=\sqrt{\frac{30\eta L}{980\left(G_s-G_w\right)t\rho_w}} \qquad ⑫$$

ここで、

d：最大粒径（mm）　η：水の粘性係数（poise）　t：沈降時間（分）
L：土粒子が t 分内に沈降する距離（cm）　…　すなわち有効深さ
G_s：土粒子の比重　G_w：水の比重　ρ_w：水の密度（g/cm^3）

5．深さ L において 1cm^3 中に懸濁している土の百分率を式⑬から求める。

$$P=\frac{100}{W_s/V}\frac{\rho_s}{\rho_s-\rho_w}\left(r'+F\right) \qquad ⑬$$

P ：懸濁して浮遊している土の試料の百分率　W_s：全炉乾試料の重量（g）
ρ_s：土粒子の密度（g/cm^3）　ρ_w：水の密度（g/cm^3）　F ：補正係数（**表 3-1**）
V ：懸濁液の容積　r'：比重計の読みの少数部（メニスカス補正した値）

表 3-1　種々の温度における補正係数 F

℃	補正係数	℃	補正係数	℃	補正係数	℃	補正係数	℃	補正係数
4	-0.0006	9	-0.0005	14	-0.0001	19	+0.0006	24	+0.0016
5	06	10	05	15	0.0000	20	08	25	18
6	06	11	04	16	+0.0001	21	10	26	20
7	06	12	03	17	03	22	12	27	23
8	06	13	02	18	04	23	14	28	25

（注）但し、比重計のガラスの体積膨張係数を 0.000025 とした場合

6．比重計試験後のフルイ分けにおいて、各フルイに残った試料の百分率を式⑭より求める。

$$P_x = \frac{W_x}{W_{2.0}}\left(100 - P_{2.0}\right) \qquad ⑭$$

ここで、

P_x ：あるフルイに残った分散土試料の全試料に対する百分率
W_x：あるフルイに残った分散土試料の重量
$W_{2.0}$：2 mm フルイを通過した分散土試料の炉乾燥重量
$P_{2.0}$：2mm 以上のフルイに残留する土の百分率

7．粒径に対する累積百分率を片対数グラフ用紙に記入し、**図 3-5** の例にならって土の粒径加積曲線を作製する。
8．粒径加積曲線から次の割合を求める（国際土壌学会法による土の区分）。
- 2.0mm 以上の土粒子（礫）の割合
- 2.0～0.2mm の土粒子（粗砂）の割合
- 0.2～0.02mm の土粒子（細砂）の割合
- 0.02～0.002mm の土粒子（シルト）の割合
- 0.002mm 以下の土粒子（粘土）の割合

ヒント：
1) 粒度分析は、細粒土（粘土）分析と粗粒土（砂）分析の２つの分析試験からなります。前者は比重計法。後者は比重計法後、粘土分を洗い流し、ふるい分けで行います。
2) 細粒土分析では粒径を式⑫から、百分率を式⑬から求めます。
3) 式⑭で求まる百分率は各フルイの残留率です。このままでは粒径加積曲線は作れません。

課題

1．国際土壌学会の基準によると、あなたの試料は組成上どのように呼ばれるでしょう？**図 3-6** にならって答えなさい。
2．ストークス則で求められる粒径とは、一体何のことでしょうか？また、ストークス則が成立するための前提条件は何でしょうか？
3．土試料の各成分の和は 100%になりましたか？ならなかった場合、その原因はなんでしょうか？
4．この方法で 0.001mm 以下の試料の割合を調べるとします。あなたはどれだけ待たねばならないでしょう？計算しなさい。

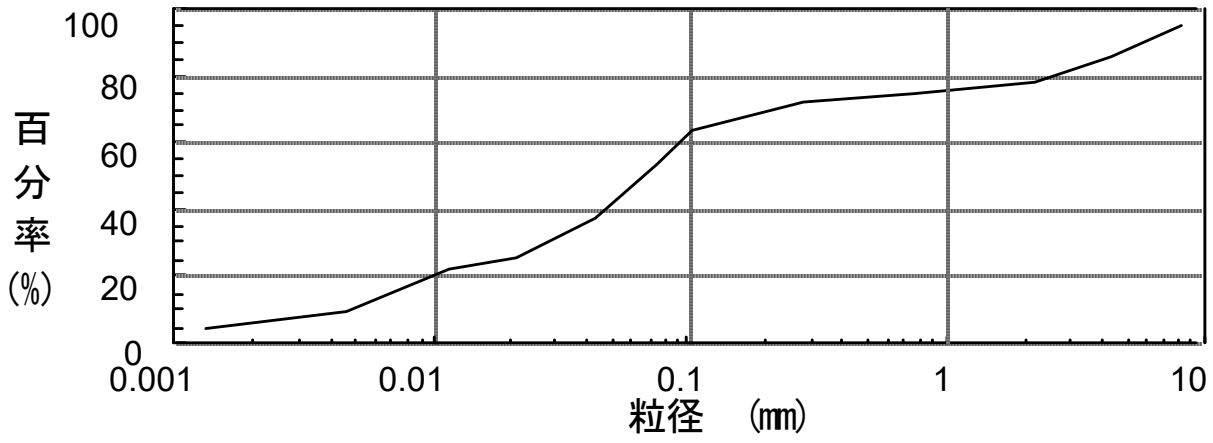
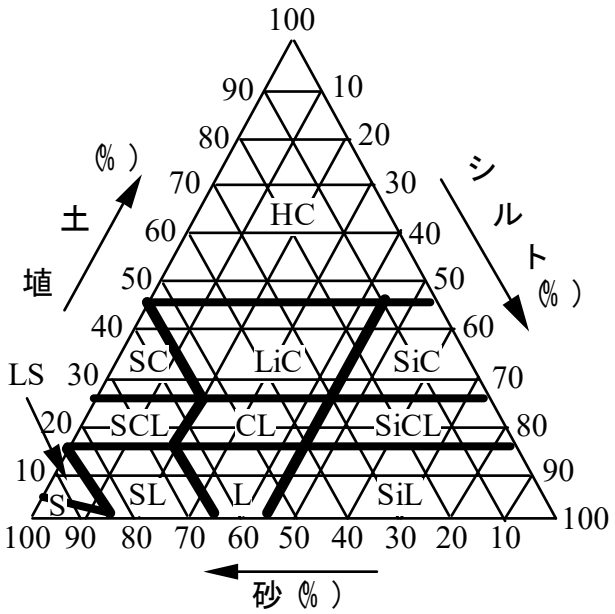


図 3-5　土の粒径加積曲線の例



HC	heavy clay	重埴土	SC	sandy clay	砂質埴土
LiC	light clay	軽埴土	SiC	silty clay	シルト質埴土
SCL	sandy clay loam	砂埴壌土	CL	clay loam	埴壌土
SiCl	silty clay loam	シルト質埴壌土	SL	sandy loam	砂壌土
L	loam	壌土	SiL	silt loam	シルト質壌土
LS	loamy sand	壌質砂土	S	sand	砂

図 3-6　国際土壌学会による土壌分類

（５）粒子の沈降実験（補足実験）

比重計法（粒度分析）の待ち時間など、余力があればやってみよう（レポートボーナス点進呈対象）。

準備するもの

メスシリンダ	1000 ml のもの	1 個
ストップウォッチ		1 個
ピンセット		1 個
釣り糸	太さ（d）2 種類、長さ（L）5 種類以上 例えば L = 1, 2, 3, 4, 5, 10 mm	1 組

実験手順

1．メスシリンダに水を適量入れる。
2．釣り糸をピンセットでつまみ水中へ落とす。
3．一定の距離を落下するのに要する時間を測定する。

計算と結果

1．各試料について、落下速度（v）を計算する。
2．v - d、v - L のグラフを作る。

課題

1．ストークス則を用い、各釣り糸の等価粒径を求める。
2．粒子の大きさの他に実際の土粒子の沈降や浮遊を支配しているものについて考えなさい。
3．円柱の体積 V が $\pi d^2L/4$、表面積 S が $d(L+d/2)$ であることに注意して、釣り糸の落下速度の理論式を作ってみよう！

４．土の飽和透水係数

（１）はじめに

水は雨（雪）として大地に降り、地表・地中を通って河川や湖沼、やがては海へと流れ出てゆきます。海へたどり着いた水は、太陽エネルギーを受けて大気中に戻り、再び降雨となって大地へもたらされます（**図 4-1**）。このように水は地球上を循環しており、その過程で自然界の生物を育んでいます。人間もまた、この水循環なしには生きていけません。時には井戸やダムを作り、エネルギーを取りだし、食料生産に利用し、生活しているのです。こうした水環境や水利用を考えるとき、大地（土壌中）の水がどんな形態で、どうやって移動し、そしてどんな役割を果たしているか？を知ることが重要となります。

土壌中の水の流れ（土壌中の水分移動）は大きく 2 つに分類されます。すなわち、地下水のように土壌間隙中に空気がほとんど含まれずに流れる飽和流と、間隙に気相も含まれた状態での水の流れ、不飽和流です。

飽和流の研究はフランスの水道技術者 Darcy による上水道のろ過の研究（1856）から始まり、地下水学、土質力学、石油工学などの分野で発達してきました。不飽和流の研究は、飽和流の研究に比べると比較的新しく、畑地農業における水の合理的利用を目的に専ら土壌物理学の分野で行われてきました。しかし、最近では、土壌中の農薬や化学物質の挙動を理解するために、環境問題や資源循環の分野で研究が進んでいる分野です。そこで本実験では、さまざまな土を用いて変水位透水試験を行い、飽和透水係数を測定することで、土の透水性を調べます。

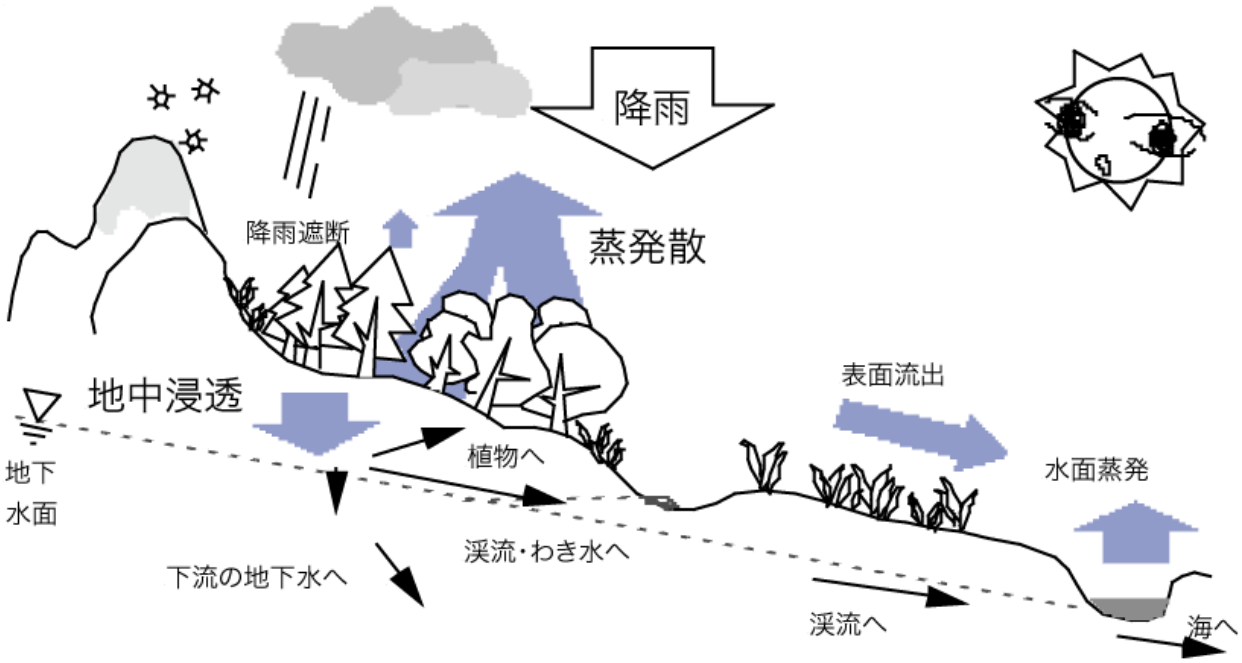


図 4-1　土壌中の水の循環

（２）ダルシー則と透水係数

飽和土壌の間隙を流れる水の流量は Darcy の法則に従い、次式に示されます（**図 4-2** 参照）。

$$J_w = k\frac{\Delta H}{\Delta x}$$

$$Q = k\frac{h}{L}At = kiAt \qquad ①$$

ここで、

- J_w ：水分フラックス（cm/s）
- ΔH ：水頭差（cmH_2O）
- Δx ：流れに沿った方向の距離（cm）
- Q ：流量（cm^3）
- h ：水位差（cm）
- L ：試料の長さ（cm）
- t ：時間（sec）
- A ：断面積（cm^2）
- i ：動水勾配（$= h/L$）

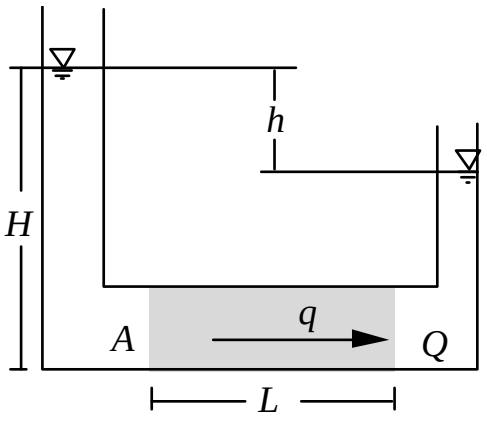


図 4-2　Darcy 則

式①の比例定数 k を飽和透水係数（saturated hydraulic conductivity）といい、土が水を通す性質を数量的に表したものです。Darcy 則は経験則ではありますが、一定の条件下では問題なく適用できると広く認識されています。なおフラックスが圧力勾配に比例するという式の形は、熱伝導や分子拡散など様々な物理現象にも多く見られる形式です。

k の測定には、水位差を一定にして水を透過させる定水位試験と、水の透過にともなって水位差が変化する変水位試験があります。主として、前者は k の大きい土（10^{-3}cm/s 以上）について、後者は k の小さい土について適用されます。

（３）変水位透水試験の原理

図 4-3 において dt 時間に dh だけ水位が減少したとすると次式が導かます。ここで a, A はスタンドパイプと試料円筒の断面積です。

$$-a\,dh = Ak\frac{h}{L}dt \qquad ②$$

時刻 $t = t_1$ において水位 $h = h_1$
時刻 $t = t_2$ において水位 $h = h_2$ とすれば

$$\int_{h_2}^{h_1} -a\frac{dh}{h} = \int_{t_2}^{t_1} Ak\frac{1}{L}dt$$

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)}\ln\frac{h_1}{h_2} = \frac{2.3aL}{A(t_2 - t_1)}\log_{10}\frac{h_1}{h_2} \qquad ③$$

となります。

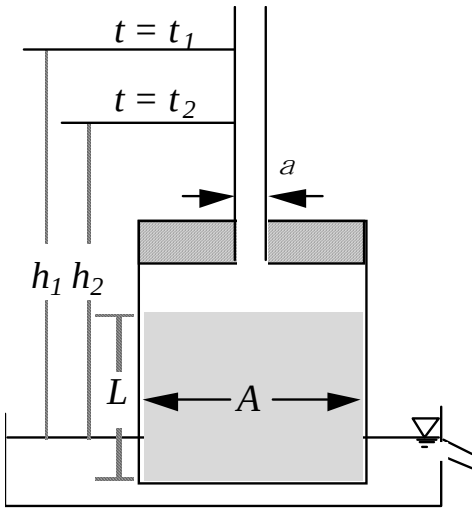


図 4-3　変水位透水試験

（４）土の飽和透水係数の測定

準備するもの

試料円筒	内径 5cm 程度のもの	3 個
スタンドパイプ	試料円筒にはめ込むゴム栓つき	3 個
受け皿、網フタ		3 個
洗浄ビン	スタンドパイプに水を注入できるもの	1 個
ストップウォッチ		1 個
温度計		1 本
ノギス		1 個
物差し		1 個
スコップ		1 個
突き固め用具	必要に応じて	
採土用具	バット、移植ごて、土壌ナイフなど	1 式
蒸発皿		5 皿
バット		2 枚
スプーン		1 本

実験手順

１．試料円筒一つに不撹乱土を採土する。同時に、土を少し持ち帰る。
２．使用するすべての試料円筒の内径、長さ、およびスタンドパイプの内径をはかる。
３．別の容器に持ち帰った土を、「実験 2」で求めた含水比と乾燥密度で試料円筒に一定量で詰める [1)]。
４．それぞれ試料の長さをはかる。
５．それぞれ試料の入った円筒に網フタをし、水を入れた受け皿の中に静かに浸ける（毛管飽和）。試料が水で飽和したら [2)]、円筒に溢れるまで水を注入する。
６．スタンドパイプについたゴム栓を試料円筒に差し込む。気泡が入らないように注意すること。
７．スタンドパイプの適当な 2 点（h_1、h_2）に印をつけ、h_1、h_2 を計る。
８．流出水位を一定に保ち、スタンドパイプ内の水位があらかじめ決めておいた高さ（h_1）を通過してから（h_2）に達するまでの時間をはかる [3)]。
９．受け皿内の水に温度計を浸け、**水温を測る**。
１０．同じ測定を数回くりかえす。
１１．水位低下が緩やかな試料を選び、スタンドパイプに物差しを当て、時間経過と水位低下の推移を記録する。
１２．試料円筒に砂および砂に粘土（ベントナイト）を適当量（混合比 5 種類程度）混ぜた混合試料を一定量詰め、粘土添加量と透水係数の関係を求める。（測定１２は 2 班共同で可）。

計算と結果

１．式③により、それぞれの試料の飽和透水係数 k を算出する。
２．水温によって水の粘性係数が違うので式④により 20℃の水温における k に換算する。

$$k_{20} = k_T\, \mu_T / \mu_{20℃} \qquad ④$$

ただし、$k_{20}, \mu_{20℃}, k_T, \mu_T$ はそれぞれ、20℃における透水係数と水の粘性係数、T℃における透水係数と水の粘性係数である（**表 5-1**）。
３．土の状態（撹乱、不撹乱）や測定の反復が k に与える影響を考察する。
４．手順 11 の記録から h-t グラフを片対数用紙に手書きでプロットし、グラフの傾きから k を求める（注意：縦軸 h を対数軸とする。また、傾きをグラフから読み取ること）。
（ヒント：グラフは右肩下がりの直線になります。また、式③から求めた k と、片対数グラフの傾きから求めた k は、同じ試料ならば、ほぼ同じ値をとることを確認しましょう。）
５．粘土添加量と飽和透水係数の関係をグラフにし、粘土の効果について考察する。

［注意］

1) 土の詰め方が緩いと反復測定中に間隙率が変化してしまう。このとき k の値は変動してしまう。そこで土を詰めるときには、適量の土を加えては突き固める作業を繰り返すようにする。
2) 飽和するまでに時間がかかるので、あらかじめ土を水に浸けておくとよい。
3) 測定の時、接合部の水漏れには十分注意すること。また、試料によっては極端に透水性の小さいものがあるので、h_1、h_2 は随時変更してもよい。

予習課題

1．撹乱土を不撹乱土と同じ乾燥密度になるように試料円筒に詰めるとき、必要な土の質量を求めよう。（撹乱土の含水比、不撹乱土の乾燥密度および試料円筒の体積は分かっているとする。）
2．計算と結果４では k を求めるために片対数グラフの傾きを利用します。そこで、片対数の傾きが左辺または右辺にくるように式③を変形してみよう。

課題

1．もし水田がこの実験で使用した土の状態だったとしたら、10a あたりに必要な水量は、一日に一体どのくらいだろうか？蒸発散量やあぜ浸透量などを適当に仮定して（ゼロは不可。必ず一定量仮定すること）、下方浸透量から推定してみよう。
2．代かきによって水田土壌表面に堆積する土粒子の粒径はどうなるか？それが下方浸透量にどう影響すると思われるか？
3．せっかく水田を作っても、代かきによって浸透量が大きくなってしまうような水田だったら、何らかの対策が必要である。あなたならどんな土地改良をしますか？

表 5-1　水の粘性係数　（×0.001 poise）

℃	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	17.94	17.32	16.74	16.19	15.68	15.19	14.78	14.29	13.87	13.48
10	13.10	12.74	12.39	12.06	11.75	11.45	11.16	10.88	10.60	10.34
20	10.09	9.84	9.60	9.38	9.16	8.94	8.74	8.55	8.36	8.18

表 5-2　土の透水性の一覧

透水係数 cm/s	10^2　10^1　10^0　10^{-1}　10^{-2}　10^{-3}　10^{-4}　10^{-5}　10^{-6}　10^{-7}　10^{-8}　10^{-9}				
排　水　性	排水良好			排水不良	実用上不透水
土 の 種 類	砂利 (細粒土を含まない)	砂、砂と砂利の混合物 (細粒土を含まない)	微粒砂,有機質シルト,無機質シルト,シルト,砂粘土の混合物,氷河堆積物,成層粘土など 植物および風化作用により変更した不透水の土		不透水の土 すなわち風化帯以下の一様な粘土
透水試験の直接的決定法	現場試験（揚水試験） （適当に行えば信頼性も大きいが相当の経験を要する）				
	定水位透水試験 （わずかの経験でよい）				
		変水位透水試験 (信頼性が大きくわずかの経験で可)	（信頼性がなく非常な経験を要す)	(信頼性は十分であるが相当な経験を要する。)	
透水係数の間接的決定法	粒土分布より計算 (細粒土を含まない砂、および砂利にのみ可能)			圧密試験より計算 （信頼性は大きいが経験を要する。）	

5. 熱電対の検定

（1）はじめに

農地の地温管理や土中の熱の流れを調べるためには、土中の温度を測定する必要があります。土中の温度を計測できる簡単な温度計の一つに熱電対（thermocouple）があります。熱電対は-200℃以下～2000℃程度までの広い測定範囲をもち、比較的安価であること、遠隔測定ができること、測温部が小さいことなどの特徴から、土壌の分野にかぎらず様々な現場で用いられています。そこで本実験では、熱電対の検量線を作ることを目的とします。そして、熱測定の基礎を確認するとともに、熱電対による温度計測の理解を深めます。

（2）温度と温度センサ

温度は、物質を構成する基本粒子の運動の激しさを巨視的に表現する尺度です。例えば、コップの中の水は巨視的には静止しているように見えますが、もし水分子のレベル（ミクロな状態）で観察できるなら、水分子がどれも激しく運動している様子が見えるはすです。ある状態における水分子の運動は（平均的に）より激しく、またある状態ではより穏やかになります。温度とは、こうした平均的な分子運動の激しさ、すなわち運動エネルギーの大きさを示す状態変数なのです。

温度計測の歴史は、気体や液体の熱膨張を利用した機械的なもの（機械式温度計）から始まりました。近年では，工業的に要求される温度の測定範囲が広がり，なおかつ測定精度に対する要求も厳しくなっている事から，電子式センサを利用する計測技術の開発が進んでいます。

一方で、測定精度の向上からセンサごとの絶対値のずれが無視できなくなり、国際標準で実用的な「国際実用温度目盛」が定められました。これが日常使われているすべての温度基準となっています。一般によく使用される「温度の単位」としては，以下のものがあります。

＜ファーレンファイト度（華氏温度）＞

ドイツの実験科学者ファーレンファイト（Fahrenheit, Gabriel Daniel）は、種々の液体の沸点が大気圧によって変化することを調べました。1714 年には、アルコール温度計に代わり初めて水銀温度計を作り、華氏目盛りを導入しました。単位としては「°F」と表記します。「華氏」はファーレンファイトの中国名「華倫海」に由来し、主にアメリカやイギリスで使用されています。

＜セルシウス度（摂氏温度）＞

スウェーデンの実験物理学者セルシウス（Celsius,Anders）は、1742 年に水の氷点と沸点の間を 100℃に分けることを提案しました。単位としては「℃」と表記します。また、「摂氏」の表記は、セルシウスの中国名「摂爾修」に由来します。

＜ケルビン温度（絶対温度）＞

アイルランドの物理学者であるケルビン卿（Kelvin of Largs）が、1848 年に温度計の物質の特性に依存しない温度目盛りを理論的に定義しました。単位としては「K」と表記します。熱力学の法則に基づいて定義されており、物理現象を式で表現する際に大変有効です。

こうした温度を測定するセンサには接触式と非接触式があります。接触式は直接物体に接触して測定する方式で、センサの構成が簡単で広く用いられています。代表例としては，白金測温抵抗体，サーミスタ、熱電対などがあります。非接触式は物体から放射される赤外線を測定し、その量から物体の温度を測定する方式で，一般にセンサの構成は複雑になります。

＜白金測温抵抗体＞

金属の抵抗の変化から温度を求める温度センサを測温抵抗体と呼びます。その中でも，化学的に安定でしかも高純度のものが得られやすい白金抵抗温度センサは、JIS に規定され標準温度計として用いられています。白金の細線をコイル状に巻いたものが多く，外形が他のセンサに比べると大きくなるのが欠点ですが、蒸着等の方法で小型化したものも製品化されています。

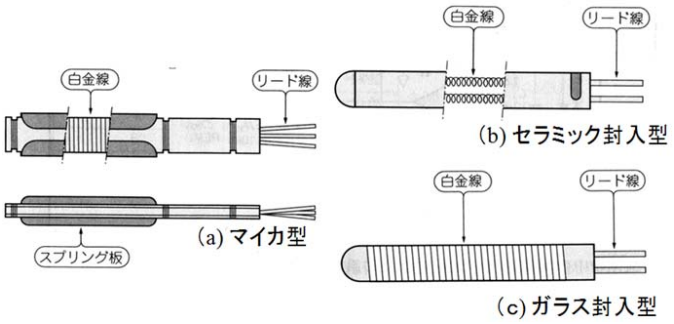


図 5-1　白金測温抵抗体の構造

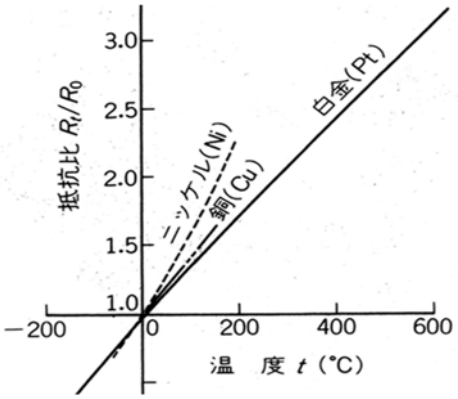
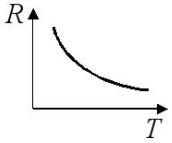
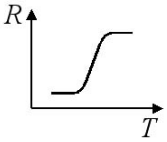
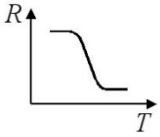


図 5-2　各種材料の温度－抵抗特性

＜サーミスタ＞

半導体の温度特性を利用した半導体抵抗温度センサのサーミスタは、抵抗温度変化特性の直線性が悪く測定精度も低い。しかし、小型で白金抵抗体の 10 倍くらい感度が良いので、温度センサとしては現在最も広く利用されています。サーミスタは、その温度特性から 3 種類に大別されます（**表 5-1**）．PTC は広い温度範囲の温度センサとしては使用できませんが、NTC に比べて温度係数が 1 桁近く大きいので定温温度センサとして利用されています。また、ある温度で内部抵抗が急変する特性を利用した CTR もあります。

表 5-1．サーミスタの種類と特性

種類	温度係数	使用温度範囲	抵抗-温度特性	材料	備考
NTC (Negative Temperature Coefficient Thermistor)	負	-50～+400℃		マンガン ニッケル コバルト	各種温度測定 温度検出 保護回路
PTC (Positive Temperature Coefficient Thermistor)	正	-50～+150℃		チタン酸 バリウム	温度スイッチ
CTR (Critical Temperature Resistor)	負	0～+150℃		酸化 バナジウム	温度警報

注）単にサーミスタという場合，NTC サーミスタを指すことが多い

＜赤外線センサ（放射温度計）＞

赤外線は、波長が可視光線より長くマイクロ波より短い電磁波（76 μm ~ 1 mm 程度）の総称です。赤外線は、すべての物体から、その温度に応じた波長分布で自然に放射されます。赤外線センサの歴史は、W. Herschel (1800)の実験（プリズムで太陽光を分光したら、赤色光を越した位置に置いた温度計の温度が上昇した）に始まります。一般に赤外線センサは、赤外領域の光を受光して、受けた光を電気信号に変換し必要な情報を取り出して応用する技術です。赤外線センサは動作原理により、熱型赤外線センサと量子型赤外線センサの 2 種に大別されます。熱型赤外線センサは、赤外線を熱に変換し、素子の抵抗変化や起電力として出力を取り出します。感度や応答速度は低いものの、波長帯域が広く、常温で使用でき使いやすいセンサです。一方、量子型赤外線センサは、半導体の遷移間エネルギー差吸収を利用した光電導効果や, 半導体のＰＮ接合による光起電力効果を利用しており、検出感度が高く応答速度が速いなどの特徴を持ちます。

（３）熱電対の測定原理

熱電対は、その名の通り 1 対の金属線からなります。ある金属に温度差を与えると、金属内の自由電子が熱によって移動し低温側の密度が大きくなります（**図 5-3**）。このため、この金属の低温側は負に、高温側は正に帯電します。こうした自由電子の密度の変化は金属の種類によって異なります。そこで、2 種類の金属線を**図 5-4** のようにつなぎ、接点 A, B に異なる温度を与えると、接点間に起電力（熱起電力）E が発生することになります。こうした現象は発見者 T. Seebeck (1821)にちなみ、ゼーベック効果と呼ばれています。

熱起電力の大きさは、金属がそれぞれ均質であれば金属線の組合せと接点間の温度差だけによって決まり、金属線の長さや太さ、接点以外の部分の温度などには無関係です。そこで、一方の接点を基準温度（0℃）に保ち熱起電力を求めれば、もう一方の接点の温度が測定できることになります。

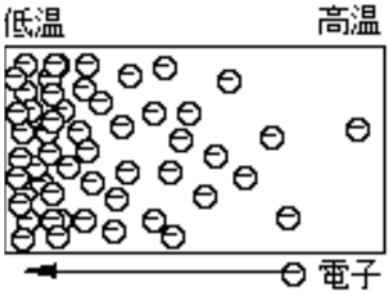


図 5-3　ある金属内の温度勾配下の電子密度

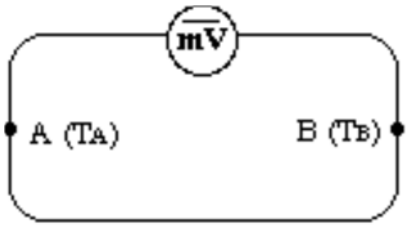


図 5-4　起電力の発生

表 6-2. おもな熱電対

熱電対の種類 記号（旧記号）	＋側金属	－側金属	最大温度範囲 [℃]
T (CC)	銅	コンスタンタン	－270～＋400
J (IC)	鉄	コンスタンタン	－210～＋760
E (CRC)	クロメル	コンスタンタン	－210～＋1000
K (CA)	クロメル	アルメル	－270～＋1370
R (PR)	白金 13%ロジウム	白金	0～＋1760
B	白金 30%ロジウム	白金 6%ロジウム	0～＋1820
N	ニッケル/クロム/シリコン	ニッケル/シリコン	－270～＋1300

クロメル：ニッケル・クロム合金，アルメル：ニッケル・アルミニウム合金，コンスタンタン：ニッケル・銅合金

（４）熱電対の検定

準備するもの

熱電対	銅-コンスタンタン線	2 組
電圧計		1 台
バナナクリップつき銅線		2 組
温度計		2 本
魔法瓶		2 本
はんだごて		1 本
はんだ		1 巻
ニッパー		1 本
ボンド		適量
金属線（銅線と針金など）		一組

検定手順

1．熱電対の片端の素線（銅線とコンスタンタン線）をそれぞれ数 mm 剥き出し、素線同士を確実により合わせて測温接点を作る。測温接点をはんだ付けしたのち、ボンドなどで絶縁する。
2．熱電対の反対側の片端も「１.」と同様に処理する。
3．熱電対の中央付近で銅線を切断し、バナナクリップ付き銅線と接続する（**図 5-5**）。
4．電圧計（デジタルボルトメータ）の 0 補正をする。（本年度は補正済みです）
5．一方の魔法瓶に氷水（0℃の水：定温部とする）を、もう一方の魔法瓶にお湯（5～80℃程度）をいれ、それぞれに熱電対の接点（片方の先端結線部）と温度計を差し込む。
6．それぞれの魔法瓶の中の温度を読み、同時に電圧計の値（電位差）を読む。
7．お湯の温度を幾度かかえて、熱電対の接点間の温度差と電位差の関係を求める。
8．銅線と金属線を両端 2 点で結線し、自作の熱電対を作成する。
9．銅－コンスタンタン熱電対の検定と同じ要領で温度差と電位差の関係を求める。

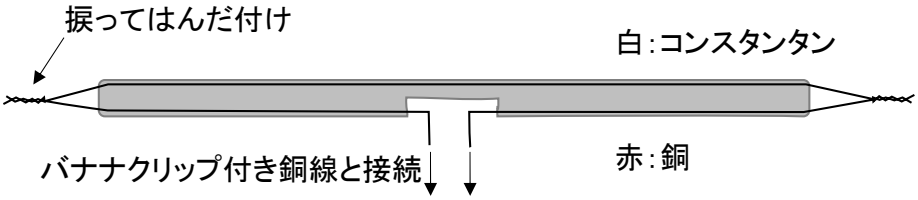


図 5-5　熱電対の準備

計算と結果

1．各熱電対の温度差と電位差の関係をグラフに示す。
2．最小二乗法を用いて実測値を直線回着する。（平均二乗誤差 RMSE まで求めること）
3．二組の熱電対の検量線（回帰直線の式）を個別に与えるべきか否か、検量線の切片を 0 にすべきか等を考察し、最終的に用いる検量線を決定する。
＊　作成した二組の熱電対とその回帰直線の式（検量線）は「１１．土の熱的性質」で使用します。

課題

1．熱電対による温度測定で生じる誤差の原因を考察しなさい。
2．銅-コンスタンタン熱電対とあなたの作った熱電対のグラフにはどんな違いがありましたか？また、違いが現れた理由はなんでしょうか？

補足：MS-Excel の Solver を用いたフィッティングの例（最小二乗法）

1．測定した温度差ΔT と熱起電力ΔE のデータを入力します（図 5-6a の例なら A6 - B12）。
2．適当に傾き A と切片 B を与え、熱起電力から温度を計算します（図 5-6b なら C6 - C12）。
　なお、ΔT＝A×ΔE＋B です。
3．各測定温度に対して「2．」で計算した温度との差の二乗を計算します（図 5-6c なら D6 - 12）。
4．差の二乗の総和を計算します（図 6-6d なら D3）。
5．「データ」のタグにある「ソルバー」を起動します（図 5-6e）。
6．「目的セル」に差の二乗の総和（図 6-6f なら D3）を選択、「目標値」を最小値に設定、「変数セルの変更」に傾きと切片（図 5-6f なら B2-B3）を選択し、「制約のない変数を非負数にする」のチェックを外したら、「解決」すると、測定値にフィッティングした式（ΔT＝A×ΔE＋B）のパラメータ A と B を得られます。

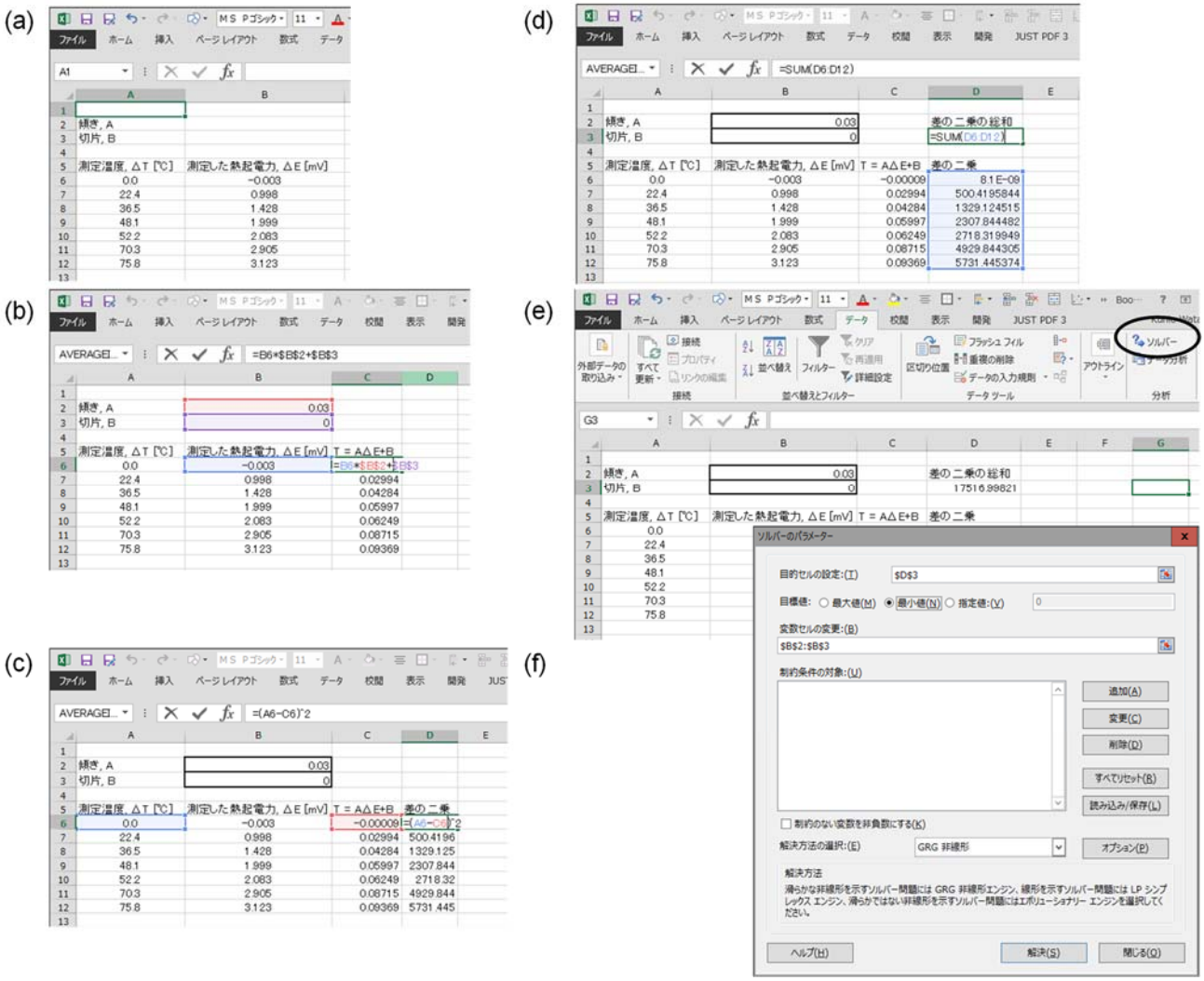


図 5-6　MS-Excel の Solver を用いた回帰直線の作成例

6. 土の塑性と液性限界

（1）はじめに

土の持つ独特な性質の一つに塑性があります。土は水と練りあげることで様々な形に成形することができるのです。私たちはこの性質を、器作りや建設に活用し、生活を豊にしてきました。また、土は過剰に水を含むと液体状態になります。どのくらいの水分を含むと液体になるのかを知ることは土砂災害や地滑り対策、土壌保全を考えるうえでも大切です。

土はその含水比に応じて、どろどろの液体、ねばねばして成型できる状態、少し乾きぼろぼろし成型が困難な状態、完全な固体・粉体と様相を変えます。それぞれの状態を液体、塑性体（可塑体）、半固体、固体・粉体とよびます。また、土の水分量を変えていくとき、土が塑性体から液体に移行する含水比を液性限界（liquid limit, LL）、塑性体から半固体に移行する含水比を塑性限界（plasticity limit, PL）、半固体から固体に移行する含水比を収縮限界（shrinkage limit）とよびます（**図 6-1**）。これらの含水比は総称してアッターベルグ限界（Atterberg limit, consistency limit）とよばれ、LL と PL の差は塑性指数（plasticity index, I_P）とよばれます。I_P の大きな土壌は、雨などによる少々の含水比変化では、崩壊する恐れの少ない安定した土壌と言えます。しかし、物質の融解などの相転移現象とは異なり、土の塑性や液性の変化は徐々に起こるものです。それゆえ、その判定法や測定法に関しては何らかの約束が必要となります。そこで本実験では JIS A 1205 で統一化された手法に基づき土の液性限界と塑性限界を求めます。

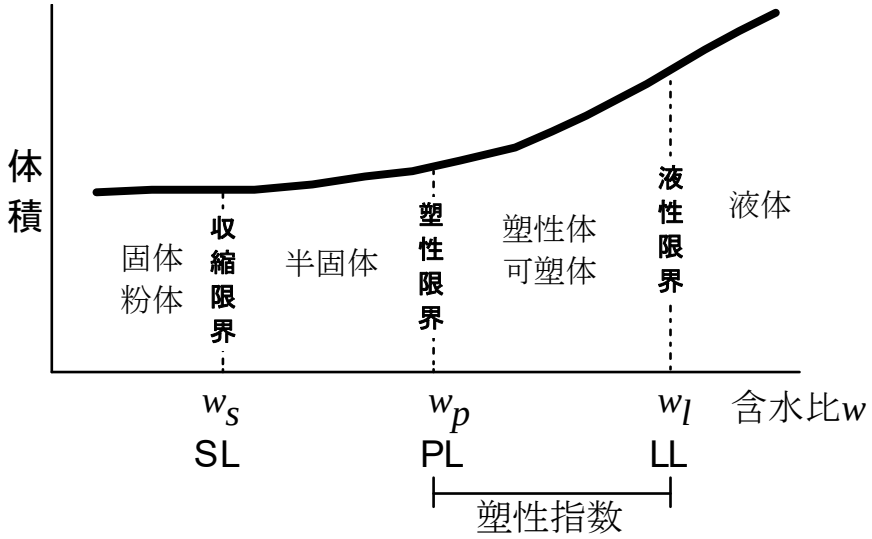


図 6-1　アッターベルグ限界の定義

（2）コンシステンシー

液性限界、塑性指数を用いて細粒土を分類する方法として、**図 6-2** の粗性図が用いられています。塑性図は縦軸に塑性指数、横軸に液性限界をとり，粘土とシルトを分ける A 線（$I_P = 0.73\ w_L - 0.146$）と圧縮性の大小を判断する B 線（液性限界 0.5 g/g）の 2 本の線を引きます。これらの線との大小関係から塑性、圧縮性、透水性などの工学的な性質の概略を推定することができます。

たとえば、A 線より上に位置する土ほど塑性が高く、乾燥時の固結や低透水性など粘性土としての特徴に富むようになります。一方、A 線より下に位置する土ほど塑性が低く、乾燥にともないボロボロになる、透水性が高い、塑性の幅が小さいなど粗粒的性質を持つようになります。また、B 線より左に行くほど圧縮性が小さく，右に行くほど圧縮性が大きいと言えます。

液性限界と塑性限界、塑性指数を用いて、コンシステンシー指数 I_C や液性指数 I_L を定義することもできます。

$$I_C = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} = \frac{w_L - w}{I_P} \quad ①$$

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} = \frac{w - w_P}{I_P} \quad ②$$

I_Cは粘性土の硬軟や安定の程度度を示します。自然含水比（w）が塑性限界（w_P）に等しい場合は$I_C = 1$となり、塑性限界（w_P）より低い場合は$I_C > 1$となります。それゆえ、$I_C \geqq 1$のとき、土は硬く、安定な状態にあると判断できます。また、I_Cが小さな値のときは含水比が液性限界（w_L）に近く、不安定な状態にあることとなります。一方、I_Lは0に近いほど土が塑性限界に近く、硬い状態にあることを示し、1に近いほど軟らかい状態にあることを示します。

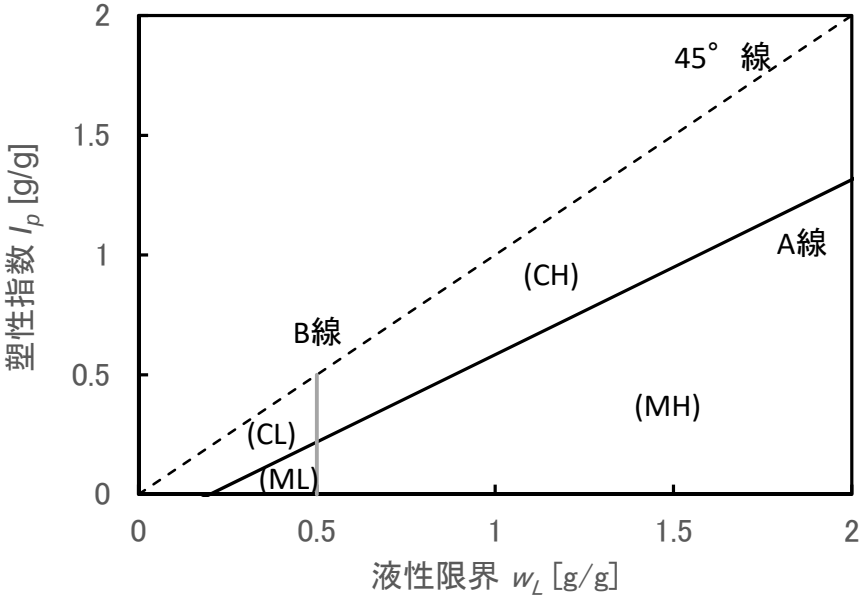


図 6-2　統一土質分類塑性図

（３）土の液性限界試験・塑性限界試験

準備するもの

0.425 mm フルイ		1 個
液性限界試験器	レバーを回すと黄銅性の皿が一定高さに持ち上げられ，落下するように作られている．	1 台（2 班共用）
すりガラス板	（あるいはアクリル板）	1 枚
蒸発皿		数皿
バット		2 枚
スプーン		1 本
雑巾		

実験手順

１．試料の一部を前もって風乾しておき、その 0.425 mm フルイ通過分を用います。

＜液性限界＞

２．**図 6-3** に示すように、試験器の黄銅の皿に最大厚さ（皿の中央付近）が約 1 cm になるように試料を入れ、へらを用いて真ん中に幅 2 mm の溝を切る（土が動かないように。へらの向きにも注意）。

３．1 秒間に 2 回落下するような速度で（先に練習しておくと良い）、試料の溝が約 1.5 cm 合流（溝の両側の土が流れてきて溝がつぶれること）するまで回転し、回転数を記録する.

４. 含水比を変えた試料を用いてこの測定を繰り返す（濡れた試料から始め、土を足していくと良い）。

＜塑性限界＞

５．水と土試料をよく練り、手のひらとすりガラス板の間で転がしながらひも状にする。このとき、ひもの直径が約 3 mm になるように整形する（**図 6-4**）。

６．直径 3 mm まで整形できたら、土試料を再び塊状に丸め、再度「５.」の操作を行う。この過程で土の含水比は徐々に低下する（転がしていると少しずつ乾いてゆく）。

７．直径 3 mm のひもを整形しようとしても、切れ切れになって整形できなくなったとき、切れ端になった土を集めて含水比を測定する（この含水比の班員全員の平均値を塑性限界とする : 蒸発皿の重さは先に測っておき、迅速に測定する。）。

なお、液性限界試験で溝が切れない場合や塑性限界試験で直径 3 mm のひも状にならない場合を NP（Non Plastic）と表します。

計算と結果

１．液性限界試験の含水比と落下回数との関係をプロットし、プロットから落下回数が 25 回に相当する含水比を読み取る。これを液性限界とする。

２．試料の塑性指数 I_p を求める。

３．液性限界と塑性限界の含水比（w_l, w_p）にもとづき、採土した時の土のコンシステンシー指数 I_C と液性指数 I_L を求める。

課題

１．粗性図にもとづき、採土した土の特徴を推定しなさい。

２. 土粒子の性質や大きさが土のコンシステンシーに及ぼす影響を考察し、試料に用いた土のコンシステンシーの改善案を提案してください。

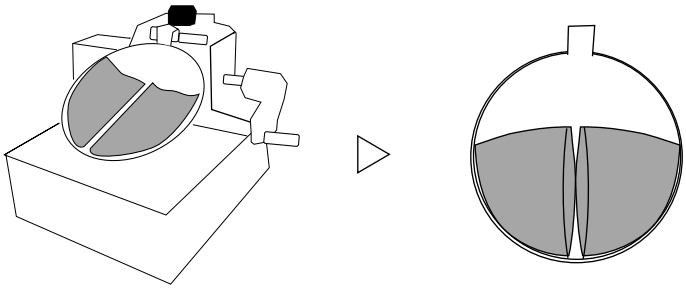


図 6-3　液性限界試験

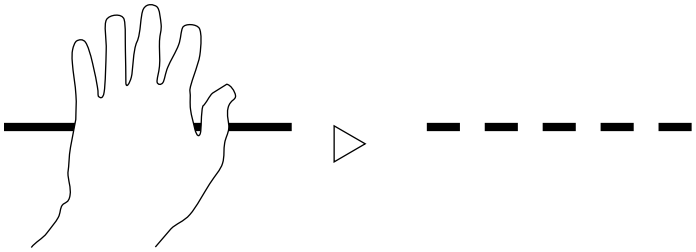


図 6-4　塑性限界試験

7．土の水分保持

（1）はじめに

降雨や灌漑によって地表から浸入（浸潤）した水は、下方への排水や地表面からの蒸発により根圏から失われる一方で、土の中にも保持されます。このような水分保持力は土によって大きく異なり、作物栽培を行う上で水持ちの良し悪しを判断する大事な指標にもなります。また、土中水分量は地温の変動や化学物質の移動にも大きな影響を与えることから、土の水分保持力を把握することは、土壌環境を把握する上で重要な要因の一つです。そこで本実験では、土柱における排水と毛管上昇を観察し、土の水分保持力を表す水分特性曲線を求めます。

（2）水分特性曲線

土に保持されている水のエネルギー状態であるマトリックポテンシャルψ_m（水頭単位の場合は土中水圧力 h）と体積含水率θ の関係が水分特性曲線（水分保持曲線）です（**図 7-1**）。

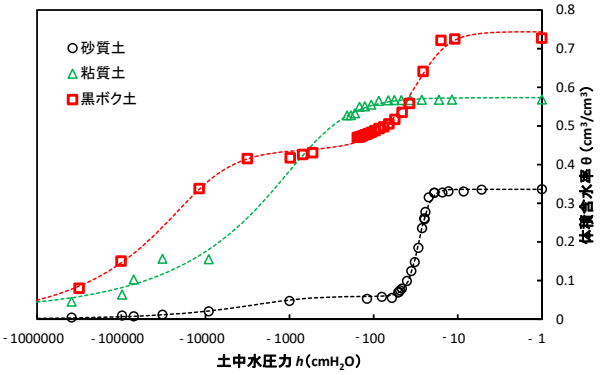


図 7-1　様々な土の水分特性曲線

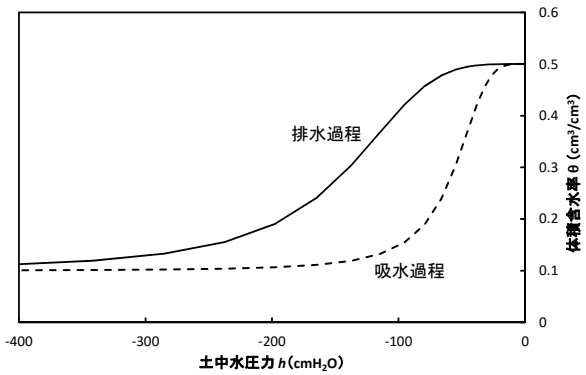


図 7-2　水分特性曲線のヒステリシス

異なる土性の土について同量の体積含水率を示す場合でも、土中水は異なるエネルギー状態で土に保持されています。植物が使える水かどうかは、このエネルギー状態によって決まります。土の水分保水は主に２つに分けることができ、およそ h > -5,000 cm では土壌間隙における毛管保水、$h \leq$ -5,000 cm では土粒子表面における表面保水となります。また、土が湿っていく場合（吸水過程）と乾いていく場合（排水過程）では、体積含水率と土中水圧力の関係が異なるヒステリシス（履歴現象）が生じることも知られています（**図 7-2**）。

測定して得られた水分特性曲線は、水分移動特性関数をフィッティングして利用することが多く、それによって測定点間の体積含水率－土中水圧力を求めることができます。さらに、毛管保水と毛管中の水の流れの関係に基づき（毛管モデル）、水分特性曲線から不飽和透水係数 k を求めることも可能になります。代表的な水分移動特性関数として、van Genuchten-Mualem モデル（van Genuchten, 1980）が挙げられます。

$$\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=S_e=\left(1+|\alpha h|^n\right)^{-m} \qquad ①$$

$$k(h)=k_s S_e^l\left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \qquad ②$$

ここで、θ_s は飽和体積含水率、θ_r は残留体積含水率、S_e は有効飽和度、α、n、m はそれぞれ形状を決

めるパラメータ（ただし $m = 1 - 1/n$）、k は不飽和透水係数、k_s は飽和透水係数、l は間隙結合係数（$= 0.5$ と仮定）です。近年では PC を使った土中の水分移動シミュレーションがよく行われています。その際に、土の保水性と透水性を特徴づけるものとして、水分移動特性関数のパラメータを土の条件として与える必要があります。

水分特性曲線の測定方法は、測定対象の土中水圧力領域によって様々存在します。吸引法は、土に水頭差を与えて、水が引っ張る力と平衡する水分量を測定します（およそ $0 \geq h \geq -200$ cm）。加圧板法は、密閉容器中の空気を加圧して土中の水を押し出し、平衡した水分量を測定します（およそ $-100 \geq h \geq -15{,}000$ cm）。露点法や蒸気圧法では、試料と平衡した空気の相対湿度を測定し、土中水圧力に変換して水分量との関係を求めます（$h \leq -5{,}000$ cm）。$h \geq -50$ cm の湿潤な領域については、任意の土柱を使って毛管上昇または浸透と排水を行い、平衡状態の水分量と高さの関係から水分特性曲線を作成する「土柱法」も有効な手段です。

（３）土柱法による水分特性曲線の測定

準備するもの

2 cm 高さアクリル円筒	37 個
突き固め用具	2 本
蒸発皿	30 個

実験手順

1．2 cm 高さのアクリル円筒 16 個をクリアテープで接続し、高さ 32 cm の円筒を作成する。下端にはガーゼを張り付けておく。同様に円筒 21 個を接続し、高さ 42 cm の円筒を作成する。
2．アクリル円筒 1 つ分に充填する試料の量 W を所定の乾燥密度 ρ_b と含水比 ω から計算し、蒸発皿に測り取る。
3．試料を円筒に突き詰めながら充填し、高さ 30 cm と 40 cm の土柱を作成する。この時、高さ 4 cm ずつ決まった量を詰めることで均一な土柱を作成する。
4．水を張ったバットに作成した 20 cm の土柱を静置し、平衡に達するまで毛管上昇させる。この時、バットの水がなくならないように注意する。
5．40 cm の土柱については、上端から静かに水をそそぐ。この時、地表面が乱れないように濾紙を敷いておく。土柱全体が十分に湿るまで水を流した後、排水が止まって平衡に達するまで静置する。
6．平衡に達した土柱を 2 cm のアクリル円筒毎に切り出し、それぞれ試料の一部を蒸発皿に取り出して重量を量る。
7．24 時間炉乾燥し、再度重量を測定することで、含水比を計算する。

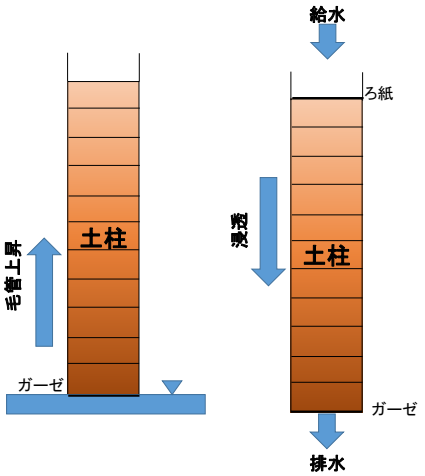


図 7-3　実験の概略図

計算と結果

１．炉乾燥前後のデータから各円筒の含水比を求め、充填時の乾燥密度を用いて、体積含水率を計算する。

２．2 つの土柱について、水が動かない時（水理学的平衡条件）の水頭分布をグラフにし、土柱の位置（高さ）と土中水圧力の関係について確認する。

３．体積含水率θ と土中水圧力 h の関係をグラフにする。

４．得られた水分特性曲線に対し、van Genuchten-Mualem の水分移動特性関数（①式）を最小二乗法でフィッティングし[1)]、パラメータ θ_s、θ_r、α、n を求める[2)]。そして、３で作成した水分特性曲線の実測データに重ねてグラフにする。

５．（追加計算）４.で得られたパラメータを用いて、②式から不飽和透水係数 k を求め、k–h 関係のグラフ、k–θ 関係のグラフを作成する。

［注意］

1) MS-Excel のソルバーを用いたパラメータフィッティングについては「５．熱電対の検定」を参照のこと。

2) 各パラメータの大きさに注意すること。$0 \le \theta_r < \theta_s < 1$、$n > 1$、 $0 < \alpha < 1$。

８．水質の評価

（１）はじめに

環境問題がクローズアップされています。投棄物から染み出した有害物質や有毒物質、あるいは農薬が地下水へ拡散していきます。乱開発の地では大雨が大地を侵食し、土砂が河川や海に流出するなど、水環境に甚大な影響が生じています。また、家庭や農場からの排水に含まれる窒素やリンは湖沼の富栄養化の原因の一つに数えられます。工場や産業廃棄物場からの排水にふくまれる化学物質等による水質汚染や地下水汚染についても不安は堪えません。

一概に水質とはいうものの、その項目は多種にわたります（**表 8-1**）。環境を保全するためには、その一つ一つを監視することが要求され、土壌や水質に関わる研究者や技術者はそれら各々の測定に熟知しておく必要があります。しかし、その項目があまりにも多岐にわたっているため、とても一人で全てを行うことが不可能に近いのも現実です。

共生環境を意識した技術者としては、これら全ての細々とした測定方法に通じることよりも、測定された項目の意味を総合的に反映し、環境改善に反映することが重要と思われます。そこで本実験では、透視度、pH、EC、COD などの測定を通じて、土壌水の質について考えます。

表 8-1　水質汚濁成分

有害有毒物質（健康項目）	重金属	水銀、カドミウムなど	単位
	有毒物	シアン、PCB など	
有機物など（生活項目）	有機物	BOD(生物化学的酸素要求量)、	mg/L または ppm
		COD(化学的酸素要求量)で表示	mg/L または ppm
	酸素	DO(溶存酸素量)	mg/L または ppm
	浮遊物質	SS(浮遊物質量)、	mg/L または ppm
		濁度、透明度	cm など
	細菌	大腸菌、一般細菌	
	水素イオン	pH	0~14（7 が中性）
	電気伝導度	EC	μS/cm
	水温	T	℃または K
栄養塩類	窒素	T-N(全窒素), NH_4-N(アンモニア態窒素),	mg/L または ppm
		$N0_3$-N(硝酸態窒素), NO_2-N(亜硝酸態窒素)	mg/L または ppm
	リン	T-P(全リン), $P0_4$-P(リン酸態リン)	mg/L または ppm
その他	塩分		
	放射性物質、油		

（２）COD とは？

COD（Chemical Oxygen Demand : 化学的酸素要求量）は、一定の強力な酸化剤によって酸化される水中の物質の量であり、通常は消費された酸化剤に対応する酸素の量で表示されます。また、COD は食べ物などの有機物由来の汚れを示す目安（有機性汚濁の指標）であり、水がきれいかどうかを調べる基準（水質の環境基準）項目の一つになっています。

水中で酸化される物質は、各種有機物、亜硝酸塩、鉄（II）、塩、硫化物などがありますが、特殊な例を除けば主に有機物です。COD は河川水などの汚染を示す数値として BOD[1)]とともに、よく用いられる目安です。しかし、測定に用いる酸化剤の種類や濃度、酸化させる温度や時間などの条件によって、また有機物の種類や濃度によって酸化率が異なります。従って、COD の値は絶対的なものと考えず、BOD と同様に水中の有機物量の 1 指標と見るべきでしょう。

COD の測定法には、過マンガン酸カリウム法（$KMnO_4$）や重クロム酸カリウム法（$K_2Cr_2O_7$）などがありますが、ここでは前者を行います。

1) BOD(生化学的酸素要求量)は、好気性の微生物が水質中の有機物を分解するときに使う酸素量です。通常、暗所で 20℃5 日間貯蔵した後の溶存酸素量を測定し計算します。

（３）過マンガン酸カリウム法の原理

$KMnO_4$ は酸性条件下で次式のように反応する酸性溶液であり、強い酸化力を示します。

$$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$$

そこで、酸性にした試料水に一定量（過剰量）の $KMnO_4$ を加え、一定条件で試料中の被酸化性物質を酸化します（MnO_4^-が赤いので溶液は赤く染まります）。次に、一定過剰量のシュウ酸ナトリウムを加えて未反応の MnO_4^-を次式のように分解します（MnO_4^-がなくなるので、溶液は無色になります）。

$$2MnO_4^- + 5C_2O_4^{2-} + 16H^+ \rightarrow 2Mn^{2+} + 10CO_2 + 8H_2O$$

ここで、過剰の $C_2O_4^{2-}$を $KMnO_4$ 標準溶液で滴定すれば（再び色が付く）、被酸化性物質、すなわち有機物と反応した MnO_4^-量が算出できます。

（４）土壌水の採取と水質測定

準備するもの

ビーカ		1 個
プラビーカ	大・小	4 個
注射器とポーラスカップ着きチューブ		1 個
100cc メスシリンダ		1 個
温度計		1 個
透視度計		1 個
蒸発皿		1 個
薬さじ		1 本
pH メータ		1 個
EC メータ		1 個
三角フラスコ	500ml のもの	1 個
滴定ビュレット	透明および褐色	2 本
ピペット		2 本
試薬	$KMnO_4$, $Na_2C_2O_4$, H_2SO_4	適量
土壌試料・醤油		

測定手順

＜土壌水の採取＞

１．片側にポーラスカップをつけたチューブを注射器につける。

２．ポーラスカップを模擬土壌内に挿入し（沈め）注射器を引く。
注射器内に集まった水を試料原液とする。なかなか注射器内に土壌水が溜まらない場合は、模擬土壌をどろどろに作り替え、採取しなおす。200cc 以上取れれば理想的である（講義時間内では数 cc しかとれない）。

＜pH, EC, 透視度の測定＞

注射器に土壌水を採取しているあいだに透視度を測定します。

１．2 つのポリ容器に、各々土 10 g と水 50ml を入れ混合し、5 分程静置する。

２．泥水の上澄み液を試料原液とする。

３．試料原液の pH、EC を pH 計、EC 計を用いて測定する。

４．（簡易）透視度計に水道水を入れ、標識版が見えることを確認する。

５．試料原液を使用し、簡易透視度計の値を記録する。
このとき、試料原液を捨てずに残しておくこと。試料原液を全ていれても標識版が見えてしまう場合は、土壌水を再び採取し加えるか、広口ビン（あるいはビーカ）に土少量と蒸留水を入れ泥水とし、これを試料原液とする。

６．試料原液を適当倍（2, 4, 8, 16, 32 倍等）に薄めて、簡易透視度計の値を読む。
各濃度の原液の pH や EC も測定してみる。

７．試料原液を 50cc 程度蒸発皿に入れ水分を蒸発させ、泥水中の土の乾燥重量をはかる。
皿の重さ、皿＋泥水の重さを計り、炉乾燥。炉乾燥重量は、翌日の昼休みに測定。

＜COD の測定＞

１．試薬を調整する。
既に調整済みの試薬が用意してある場合はそれを用いる。よく確認すること。

（１）希硫酸 H_2SO_4(1+2)
広口ビンに水 200 mL をとり、これに 100 mL の濃硫酸を少しずつ攪拌しながら混合する。
薬品で火傷をしないように、十分に慎重におこなうこと!!

（２）シュウ酸ナトリウム標準液（0.025N）
乾燥したシュウ酸ナトリウム（$Na_2C_2O_4$）1.675 g を水に溶かし 1 L とする。

（３）過マンガン酸カリウム標準液（0.025N）
過マンガン酸カリウム（$KMnO_4$）0.8 g を水 1 L に溶かし、沸騰している水浴上で 2 時間以上加熱して一晩放置する（この実験では前日のうちにこの標準液を作っておく）。その後、褐色ビンに保存する。この溶液の濃度はおよそ 0.025 N であるが、正確な値を求める必要がある。

① 蒸留水 100 mL を三角フラスコにとり、希硫酸 H_2SO_4(1+2)を 10 mL 加える。

② ピペットでシュウ酸ナトリウム標準液 10 mL 加えて、60～80℃に加熱する。

③ 過マンガン酸カリウム標準液で滴定し、溶液が無色から薄いピンク色になるまでに加えた過マンガン酸カリウム標準液の量 **X** mL を求める。

④ ファクター*f* を求める（$\boldsymbol{f} = 10 / \mathbf{X}$）。

２．試料を用意する。

① 先に注射器で採取した原液を土壌水試料とする。足りない場合は、原液を 10~20 倍に薄め COD 測定に用いる（但し、後で原液の場合の COD 値に換算すること）。

② 純水 200 mL に醤油を一滴たらし、比較試料とする（濃い比較試料は何百倍もの希釈を要します）。

３．試料水（①②）100 mL を三角フラスコにとり、希硫酸 H_2SO_4(1+2)を 10 mL 加える。

４．過マンガン酸カリウム標準液をビュレットで 10 mL 加え、直ちに沸騰水浴中で 5 分程度加熱する。
（この段階で無色になった場合、手順 2 に戻り試料の希釈倍率を上げる）

５．水浴中から三角フラスコを取り出し、シュウ酸ナトリウム標準液を正確に 10 mL 加え溶液を無色にする（ホールピペットを用いるとよい）。

６．過マンガン酸カリウム標準液で滴定し、溶液が無色から薄いピンク色になるまでに加えた過マンガン酸カリウム標準液の量 **a** ml を求める。

７．試料水の代わりに蒸留水 100 mL を用いて「３．」から「６．」の操作をし、ブランク試験における逆滴定値 **b** mL を求める。

８．次式[1)]により、各試料溶液の COD 値を求める。

$$\mathrm{COD}\ (O_2\ \mathrm{mg/L}) = \boldsymbol{f} \times 0.025 \times (\mathbf{a} - \mathbf{b}) \times 8 \times 1000 \div 100$$

［注意］

1) COD の算出。

V mL の試料水およびブランク水を滴定するのに要した $KMnO_4$ 標準液をそれぞれ a, b mL、$KMnO_4$ が消費された量をそれぞれ x, y mL とすると、x, y はそれぞれ次式で表される。

$$x\ (\mathrm{meq}) = f \times 0.025 \times (10 + a) - 0.025 \times 10$$
$$y\ (\mathrm{meq}) = f \times 0.025 \times (10 + b) - 0.025 \times 10$$

ゆえに、試料水中の被酸化性物質と反応した量（x – y）は次式となる。

$$(x - y) = f \times 0.025 \times (a - b)$$

従って、COD 値は

$$\mathrm{COD}\ (O_2\ \mathrm{mg/L}) = f \times 0.025 \times (a - b) \times 8 \times 1000 / V$$

と表される。COD 値は、過マンガン酸カリウム消費量という表現で、（$KMnO_4$ mg/L）の値で示すこともあり、飲料水の水質検査などではよく用いられる。

$$\mathrm{COD} : 1\ (\mathrm{meq/L}) = O_2 : 8\ (\mathrm{mg/L}) = KMnO_4 : 31.6\ (\mathrm{mg/L})$$

この実験に使用する過マンガン酸カリウムなどの重金属は土壌汚染などの環境破壊の元凶となります。廃液は必ずポリ容器に捨ててください。環境をはかる実験をしておきながら、実は環境を汚染してしまった。などということがないように！！

計算と結果

1．泥水の濃度 *C*（mg/L）と透視度 *L*（cm）の関係をグラフにし、*C* と 1/*L* の回帰計算の結果をグラフ中に実線で書き込む（*C* と 1/*L* の関係を Lambert-Beer の法則などから考察する）。
2．泥水の濃度 *C*（mg/L）と pH および EC の関係をグラフにし、それぞれの**関連性を述べる。**
3．用いた土壌水の pH、EC、COD をまとめる。
4．醤油 1 滴溶液の COD から醤油原液の COD を推定する。

課題

1．近所の水の汚れ具合に与える自分の家の台所排水の影響について考えよ。
2．生活環境の保全に関する様々な環境基準を調べ、土壌圏の物質移動について考察せよ。
3．本実験では、土壌水を圧をかけて吸引しました。土壌水の圧力状態について調べ、物質移動との関係を考えなさい。

9. 土中への水の浸潤

（1）はじめに

降雨や潅漑によって地表にもたらされた水の多くは、地中に浸入（浸潤）し、土壌面蒸発や地下水帯への排水を通じて失われます。このような動的プロセスは、地表面近傍の土壌内で絶え間なく繰り返されており、植物根や土壌動物の生育環境の支配要因となっているばかりでなく、蒸発散や熱エネルギーの授受を通じて人間の生活環境にも大きな影響を及ぼしています。そこで本実験では、土中への水の浸潤過程を観察し、浸潤方程式との比較から不飽和土壌の吸水度や吸水力を求めます。なお、多くの場合、地表面近傍の土壌水の移動は不飽和状態（間隙に空気を含んだ状態）で生じています。

（2）不飽和水分移動

土壌中の水は、不飽和状態においても飽和状態同様、そのポテンシャルの高低にしたがって移動します。特殊な場合を除き、このポテンシャルはマトリックポテンシャルψ_mと位置ポテンシャルψ_zの和とみなせます。ψは、大気圧を基準とすれば、負値となります。

この場合の水分フラックス J_w（流束：単位時間、単位面積あたりの流量）は、飽和流同様、ダルシー則で表せます。

$$J_w = -k\frac{\partial(h+z)}{\partial z} = -k\frac{\partial h}{\partial z} - k \qquad ①$$

ここで、k は不飽和透水係数、z は鉛直座標（上方を正）、h はマトリックポテンシャルの水頭表記（単位は cm）です。飽和状態では、k をポテンシャル値によらず一定とみなますが（飽和透水係数）、不飽和時には土壌が乾燥するにともない k が指数関数的に減少します。したがって、不飽和時には k をしばしば h の関数として扱います。また不飽和状態では、一般に各地点の体積含水率θが、その点への水の流入量と流出量の差に応じて変動します。この変動は質量保存則（連続の式）で表せます。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial J_w}{\partial z} \qquad ②$$

適当な境界条件と初期水分条件を与えれば、①②式を連立して解くことができます。この際、θと h の関係式に水分特性曲線（水分保持曲線[1)]）が必要です。近年ではこれらの式を、PC を用いて数値的に計算することで土中の水分移動を予測することもよく試みられます。しかし、実際の圃場は成層状態にあり、空間的な変動も大きく、随所に粗間隙も存在します。そのような場で k-h 関係や水分特性曲線をいかに評価するかは大きな問題であり、その妥当性次第では、計算結果が実際の現象と著しく異なることもあり得ます。

[注意]

1) 水分保持曲線については「7．土の水分保持」を参照のこと

（3）浸潤の式（Green-Ampt の式）

明確な前線の進行をともないながら、土中に水が浸入する過程を浸潤（infiltration）といいます（**図 9-1**）。浸潤時の典型的な水分分布には、地表から前線付近までほぼ一定の水分状態（飽和に近い）にある伝達領域と、急激なポテンシャル勾配（水分変化）をともなう浸潤領域、および前線部が存在します。浸潤現象についても①②式による検討は可能ですが、初期水分状態がほぼ一定で、均質土層の場合には、Green and Ampt (1911)の解析法によって、簡単に浸潤速度の時間変化を見積もることができます。

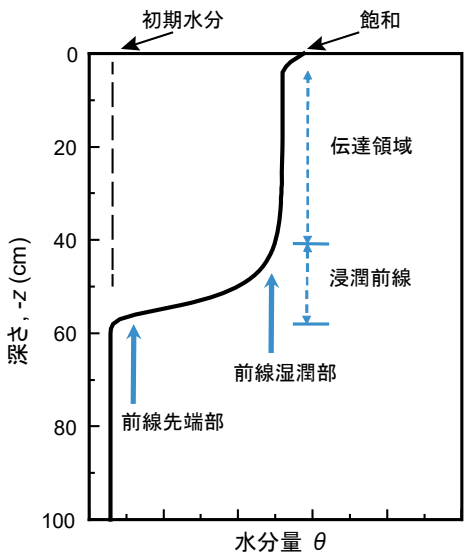


図 9-1　浸潤前線の概念図

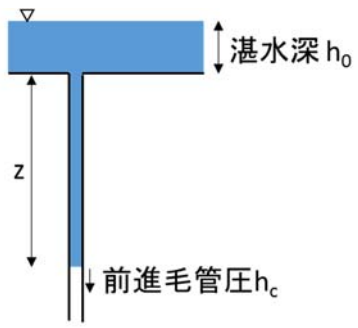


図 9-2　浸潤のモデル化

簡単のため、土壌水の移動を鉛直直線上の毛管内の移動としてモデル化します（**図 9-2**）。この場合の全ポテンシャル勾配は次式③で表せます。

$$\frac{\Delta H}{z}=\frac{(-h_c-z)-h_0}{z}=-\left(1+\frac{h_c+h_0}{z}\right) \qquad ③$$

ここで、h_c は前進毛管圧です。ダルシー則が成り立つとすれば、次式が得られます。

$$i=\frac{dI}{dt}=-k_c\frac{\Delta H}{z} \qquad ④$$

ここで、i は浸潤速度、I は積算浸潤量、k_c は伝達領域の透水係数です。一方、伝達領域の初期水分量からの水分増加量を一定値（Δθ）とみなせば、

$$I=z\Delta\theta \qquad ⑤$$

となります。ここで、③④⑤式を用いて，z を消して t で積分すれば、Green and Ampt の式⑥が導かれます。

$$k_c t=I-\Delta\theta(h_0+h_c)\ln\left\{1+\frac{I}{\Delta\theta(h_0+h_c)}\right\} \qquad ⑥$$

⑥式を変形すると

$$\exp\left(\frac{I-k_c t}{\Delta\theta(h_0+h_c)}\right)=1+\frac{I}{\Delta\theta(h_0+h_c)} \qquad ⑦$$

となります。ここで、左辺の指数関数の括弧内を 1 より小さいとして Taylor 展開し、第 3 項まで取ると次式が得られます。

$$I = \sqrt{2\Delta\theta\left(h_c + h_0\right)k_c} \times t^{1/2} + k_c t \qquad ⑧$$

これは、Philip (1958)が浸潤について①②式を解析的に解いた近似式⑨と形式上一致します。

$$I = St^{1/2} + At \qquad ⑨$$

ここで、S は吸水度（sorptivity)、A は定数です。⑧式は、t が小さい間（浸潤開始直後）は第一項の挙動が支配的であり、t が大きくなると第二項が卓越します。すなわち、積算浸入量は初期には時間の平方根に比例して増大し、時間の経過とともに時間に比例するとみなせるようになります。

（問１）⑥式、⑧式を導出しなさい。
（問２）水平方向に浸潤したときの Green and Ampt 式を導きなさい。この場合の積算浸入量はどのように増加しますか？
（問３）毛管上昇をさせる場合、Green and Ampt 式はどうなりますか？この場合、$t \to \infty$ の上昇高はどうなりますか？

（４）浸潤実験

準備するもの

試料用アクリル円筒	1 本
マリオット給水装置	1 台
ストップウォッチ	1 個
メスシリンダ	1 本
定規	1 本
突き固め用具	1 本

実験手順

１．マリオット給水装置の調整：まずコックを開けて水を出しつつ、通気管の先端に気泡を生じさせコックを閉じる。気泡が安定した形を維持すれば、装置内は気密性が保たれたことになる。
２．メスシリンダの読み Q（40, 80, 120, 160, 200 mL）に対するマリオット給水装置の目盛り y をよみ、給水装置の一目盛りの水量を決定する。$Q = ay$ の係数 a を最小二乗法により求める。
３．試料用アクリル円筒の内径を測り、断面積 A を求める。
４．底を含めた試料容器の重さを計る。試料（砂）を円筒に突き詰めながら詰める。試料乾燥重量と高さをはかり、充填密度を求める。なお、試料を均一に詰めないと浸潤前線をうまく観察できないので注意。また、試料円筒が濡れていると水が浸潤せずあふれてしまう原因となります。
５．試料の表面が給水により乱されないように上面に金網を載せる。
６．試料部とマリオット給水装置をつなぎ、コックを閉じたまま湛水が所定の値（$h_0 = 1.5$ cm）になるようにマリオット管の高さを調整する（マリオット通気管の下端が試料上端に h_0 を加えた高さになるように給水管全体を上下に移動させて固定する)。（装置の概要は**図 9–3** 参照）
７．再度マリオット給水管の正常な作動を確認する。
８．表面湛水 h_0 分の水量をメスシリンダに用意する。給水装置のコックを開き、水が試料に到達したと同時に用意したメスシリンダの水を試料表面に加える。この時点を測定開始（$t = 0$）とする。
９．$t = 0$ から 20 秒毎に、マリオット給水装置の目盛り y、浸潤前線の位置 z を同時に測定する。
１０．時間が十分（z が下端に達するまで）経過したら、表面の湛水深 h_0 を測る。
１１．この測定を 2 回成功するまで繰り返す。2 回目の測定では、表面の湛水深や試料の詰め方など条件を変更し、その影響について考察する。

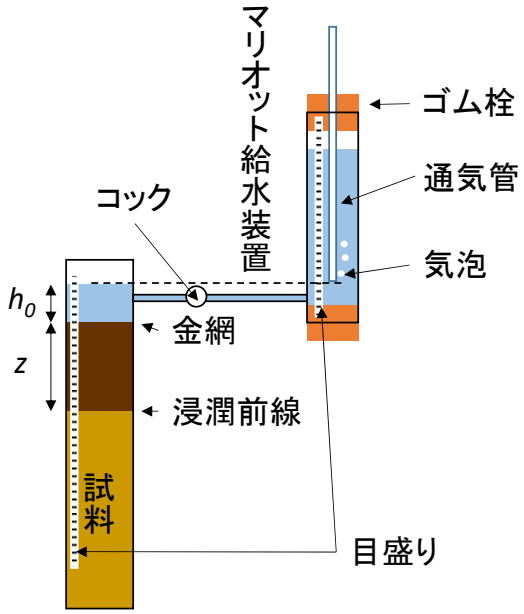


図 9-3　浸潤装置

計算と結果

1．積算浸入量 I と時間の関係をグラフにする。I は試料容器の断面積 A とマリオット装置の係数 a を用いて、$I = (a/A)\,y$ となる。
2．浸潤前線の位置 z と時間の関係をグラフにする。
3．$\Delta\theta$ と時間の関係をグラフにする。ここで、$\Delta\theta = I / z$ である。
4．浸潤速度（$\mathrm{d}I / \mathrm{d}t$）と時間の関係をグラフにする。
5．I と t のデータを用いて、最小二乗法により次式中のパラメータ S, A, C を決定する [2)]。

$$I = St^{1/2} + At + C$$

ここで、C は初期条件に由来する実験補正定数である。
6．理論式⑧⑨と比較することにより、伝達領域の透水係数 k_c と前進毛管圧 h_c を求める。

[注意]

2) MS-Excel のソルバーを用いたパラメータフィッティングについては「5．熱電対の検定」を参照のこと。

10. 土の pH と緩衝能

（1）はじめに

土壌には、外界から及ぼされる変化を和らげる力があります。例えば、熱や酸が加わると多くの環境が敏感に変化するのに対し、土壌の温度や pH は急激には変化しません。汚染水や酸性雨の流入による pH の変化をも土壌は和らげてくれるのです。こうした急激な変化を抑える作用を緩衝能と言います。この土壌の緩衝能のおかげで、植物の生育が可能となり、気候は緩和され、私たちの生活が成り立っているのです。土壌はその緩衝能ゆえに、全ての生物生産の基盤となりえ、物質循環の礎となっているのです。

ところで、酸性雨は地球規模の環境問題です。酸性雨は一般に pH が 5.6 以下の降水と定義されますが、酸性雨が降っても直ちに土の pH が下がることはありません。しかし、酸性雨が長期間にわたって降ると、土壌の pH 緩衝能は限界に達し、土壌も酸性化します。そこで本実験では、酸性雨を模した塩酸水を土壌に添加することによって、土壌の pH がどのように変化するかを観察し、pH 変動に影響を及ぼす土壌の性質を明らかにします。

（2）土の pH と酸性土壌

pH は土壌の性質を示す、最も重要な指標の一つです。これは、生物に対する栄養・有害元素の可給性（溶解性）や土中の化学反応の多くを pH が制御するからとも言えます。pH の低い土壌（一般に pH＜5.5）を酸性土壌といいます（**図 10-1**）。世界では南米、中央アフリカ、東南アジア、ロシアなど多雨で降水量が蒸発量より多い地域に酸性土壌は多く見られます。日本の土壌も基本的に酸性化します。

土壌が酸性化する要因は様々です。例えば、雨水は大気中の二酸化炭素を吸収しながら降下するため天然の炭酸水（pH 5.6 程度）と言えます。SOx や NOx などによりさらに pH の下がった雨は酸性雨と呼ばれます。雨水や酸性雨により土壌に浸透した H^+は、土壌の交換性陽イオンの溶脱と H^+による置換を引き起こします。植物の陽イオン吸収にともなう H^+の放出や有機物分解による H^+の発生も土壌を酸性化します。さらに、肥料の施用も NH_4^+の硝化や S や Cl のイオン化により土壌を酸性化します。

酸性土壌の pH（H^+の量）は交換性 Al にも支配されます。交換性 Al とは、土壌の陰荷電に結合している Al で、土壌水中に溶出（交換）される Al です。土壌水の H^+が粘土鉱物の陰荷電に吸着している陽イオンと置換すると、置換した H^+は粘土鉱物を破壊して Al を露出します。交換性 Al は土壌水中に溶解し Al^{3+}となります。そして Al の水和反応により H^+が生成し、土壌の pH を低下させます。

土壌が酸性化すると、土壌中の有害元素の増加や栄養元素の不足によって植物の生育が阻害されます。たとえば、酸性環境で溶出する Al や Mn は植物に毒性を呈します。P は溶出した Al や Fe との結合により、また Ca や Mg は溶脱により欠乏しがちとなります。それゆえ、植物の生育には適正な pH 領域が存在するのです。主要作物や科ごとの最適 pH 域（**表 10-1**）を確認しておくとよいかもしれませんね。

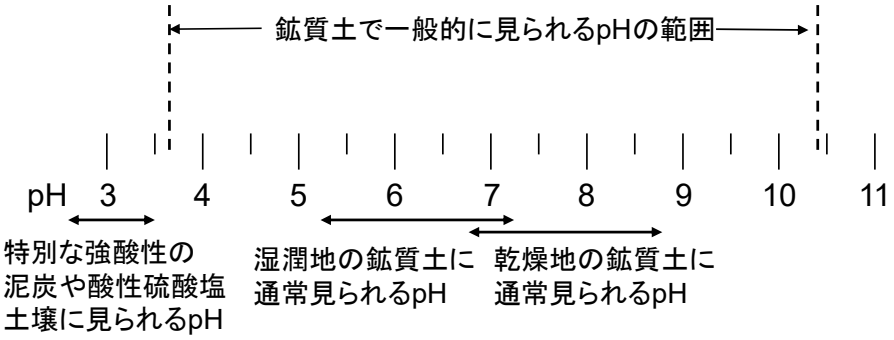


図 10-1　土壌にみられる pH の範囲

表 10-1　作物の最適 pH の例

pH	普通作物	果菜・豆類	葉根菜類	果樹・花き等
6.5～7.0	大麦		ホウレンソウ	イチジク
6.0～7.0	小麦	エンドウ トマト	ダイコン・キャベツ アスパラガス	ブドウ・アンズ カーネーション
6.0～6.5	サトイモ ダイズ	インゲン・枝豆・小豆・なす キュウリ・ピーマン・ソラマメ スイートコーン・スイカ・メロン	カリフラワー・小松菜・チンゲン菜 白菜・三つ葉・春菊・生姜・セロリ にら・ウドブロッコリー・レタス・ネギ	なし・柿・キウイ 柚・菊
5.5～6.5	稲・エンバク・ライ麦	イチゴ・落花生	玉ねぎ・ゴボウ・カブ・ニンジン	うめ・りんご
5.5～6.0	サツマイモ・山芋 陸稲・そば			モモ・オウトウ みかん
5.0～6.5	バレイショ			
5.0～5.5				栗
4.5～5.5				ブルーベリー・茶 ツツジ・シャクナゲ

（３）土の pH 測定

準備するもの

容器（遠沈管）		5 本
pH 計		1 台
洗浄ビン		1 本
土壌試料	砂、粘土、農場で採取した土	3 種
試薬	pH 3.0 の HCl 溶液、1 M の KCl 溶液	適量
マクロピペット	10 mL 測定用	1 本

実験手順

1．異なる 3 種の土壌を容器に 1 g 入れ、蒸留水を 10 mL 添加します。1 分間の振とう後に pH を測定します（A）。
2．それぞれに pH 3.0 の HCl 溶液を 5 mL 添加し、1 分間の振とう後に pH を測定します。
3．それぞれに pH 3.0 の HCl 溶液をさらに 5 mL 添加し、1 分間の振とう後に pH を測定します（B）。同様の作業を総添加量が 20 mL になるまで繰り返します。
4．土壌を容器に再び 1 g 入れ、1M の KCl 溶液を 10 mL 添加します。1 分間の振とう後に pH を測定します（C）。

計算と結果

1．それぞれの土壌に含まれる粘土鉱物や腐植の量を色や質感から推測する（多い少ない等）
2．酸添加後の pH（B）と土壌の pH（A）の差を求め、酸添加量（0～20 mL）と pH の差（A - B）の関係をグラフに示す。

課題

1．1 M の HCl 溶液は何倍に希釈すれば pH 2 になりますか？また、この希釈溶液を pH 3 にするためには、さらに何倍に希釈する必要がありますか？
2．蒸留水と KCl によって測定した土壌の pH に違いが見られるのはなぜでしょう？
3．酸性雨による土壌 pH 低下の影響は、どのような土壌で大きいと考えられますか？実験結果に基づき考察しなさい。
4．土壌の粘土鉱物や腐植の量によって、pH 緩衝能はどのように異なると考えられますか？
また、粘土鉱物や腐植のどのような性質が、土壌の pH 緩衝能に作用していると考えられますか？
5．こうした pH 緩衝能の違いは植物生産や収量にどのような影響をおよぼすと思いますか？土壌中の栄養・有害元素の溶解性と関連づけて説明できると好ましい。

１１．土の熱的性質

（１）はじめに

土壌は太陽や地殻からの熱に暖められ、寒気によって熱を奪われ、冷却ときに凍結します。こうした熱の出入りや釣合いによって、地中の温度が決まるのです。地中の温度は、根の成育や土壌微生物の活動に直接影響を与えるだけでなく、土壌水の動きを誘起します。土壌環境の形成には、土粒子の性質、水や物質の流れとともに、地中の温度や熱の流れが重要な役割を担っているのです。

地中温度の分布や変化を調べたり、地中の熱の流れ、貯熱、放熱などの関係を考えたりするには、その土壌の比熱や熱伝導率、熱容量など熱的性質を知る必要があります。しかし、土壌のように三相の混在した粉体の熱伝導は複雑です。またその測定も、熱とともに水が移動するため困難を極めます。そこで本実験では、熱電対により土壌の温度を測定し、その解析から熱伝導率を求めます。

（２）熱伝導の理論

土壌など個体内の熱移動は、フーリエの法則によって次式に表されます。

$$J_H = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \qquad ①$$

ここで、J_H は単位面積、単位時間あたりの熱の移動量（熱フラックス）、T は温度、z は距離、λは熱伝導率です。式①を連続の式②に代入すると式③の熱伝導方程式が得られます。

$$C\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial J_H}{\partial z} \qquad ②$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad ③$$

ここで、t は時間、C は熱容量（容積比熱）、$\kappa = \lambda/C$ は熱拡散係数です。
いま、平均温度を T_A、地表面温度の振幅を A_0、位相定数をϕ_0 とし、地表面 $z = 0$ で

$$T = T_A + A_0 \sin\left(\omega t + \phi_0\right) \qquad ④$$

なる一定周期の温度変化が長時間続いた場合、深さ z における T の変化は

$$T\left(z,t\right) = T_A + A_z \sin\left(\omega t + \phi_z\right) \qquad ⑤$$

$$= T_A + A_0 \exp\left(-z\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right)\sin\left(\omega t - z\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} + \phi_0\right) \qquad ⑤'$$

となります。ここで、$\omega = 2\pi/\tau$ （τ：周期）です。

（３）土壌の熱伝導率の測定

準備するもの

熱電対セット	「６.」で検定した熱電対二組、電圧計、魔法瓶等	1 式
ワグネルポット	土壌試料を入れる容器	1 組
アクリル板		1 枚
赤外線投光器		1 個
~~電圧調節器~~		~~1 台~~
扇風機		1 台
ストップウォッチ		1 個

実験手順

１．ワグネルポットの直径と深さを求め、容積を計算する。
２．ポットと熱電対 2 組を合わせた重量を量る。
３．ポットの下の孔から熱電対 2 組の接点を入れておく（実験室にある配線図を参照）。
４．一様に湿らせた土を上まで一杯に詰めて、重量を量る。
　試料は数回にわけて入れ、そのつど締め固めるように詰めるとよい。
５．土の表面からおよそ 0.5 cm と 1.5 cm のところに熱電対の接点を設置する。
６．ポットの上にアクリル板を載せる。アクリル板と土の間に隙間のないようにすること。
７．アクリル板の表面に扇風機で微風をおくる。
８．ポットの真上約 20cm のところに赤外線ランプをつるす。
９．ランプを 12 分間つけ 12 分間消すサイクルを 3 回繰返し、地温を上げ下げする。この間の地温を埋設した熱電対で 2 分間隔で測定する。熱電対による温度測定は、基本的に検定方法と同様です。基準温度（氷水の魔法瓶）にいれた接点と地中の接点の電位差をはかり、「６．熱電対の検定」で求めた関係式（検量線）により温度に換算する。
１０．測定終了後、 熱電対の深さを正確に測定する。
１１．熱電対周辺の土壌を採り、含水比 w を測定する [1)]。

計算と結果

１．各深さの温度の時間変化をグラフに示す。
２．グラフより適当な区間（12 点, 24 分間）を選ぶ。この間、実測点は 13 点含まれる。
３．選んだ区間の 1 番目と 13 番目の点を直線で結ぶ。
４．「３.」で引いた直線とグラフとの差を求め、次の表を作成する。

時間 t（min）	0	2	4	6	・・・	22	24
温度差（0.5cm 深）T_U	U_0	U_1	U_2	U_3	・・・	U_{11}	U_{12}
温度差（1.5cm 深）T_L	L_0	L_1	L_2	L_3	・・・	L_{11}	L_{12}

５．T_U-t、T_L-t の関係をグラフに示す。（周期$\tau = 24$ (min)）
６．各深さ z = U, z = L のグラフに式⑤をフィッティング [2)]し、各々の T_A と A_U, ϕ_U , A_L, ϕ_L を求める。
７．次式より熱拡散係数κ (m^2/s)を求める。

$$\kappa = \frac{\pi}{\tau}\left(\frac{z_U - z_L}{\ln A_L - \ln A_U}\right)^2 \quad \text{：振幅比} \qquad ⑥$$

$$\kappa = \frac{\pi}{\tau}\left(\frac{x_U - x_L}{\phi_L - \phi_U}\right)^2 \quad \text{：位相差} \qquad ⑦$$

８．土の乾燥密度ρ_b (kg/m^3)を求める [1)]
９．熱容量（体積比熱）C を次式より求める。

$$C = \rho_b \times (c_s + c_w \times w) \qquad ⑧$$

ただし、c_s, c_w はそれぞれ土粒子と水の質量比熱はそれぞれ ≈0.84, ≈ 4.2 (kJ/kg K)です。
１０．熱伝導率λ[3)]を求める。

$$\lambda = C \times \kappa \quad \text{(W/m K)} \qquad ⑨$$

[注意]

1) 土の含水比や乾燥密度の測定については「２．土の三相と土粒子の密度」を参照のこと
2) MS-Excel を使ったフィッティングとパラメータの求め方は「５．熱電対の検定」を参照のこと
3) 理科年表によれば、代表的な乾土の熱伝導率は 0.14（W/m K）、砂で 0.3（W/m K）、水は 0.5（W/m K）である。ということは、今回の実験で得られる値はどの程度になるはずですか？ならない場合、その理由はなぜでしょう？なお、氷の熱伝導率は 2.2（W/m K）と高い。

課題

１．湿った土壌と乾いた土壌ではどちらの方が熱が伝わり易いと思うか？式に基づき考えてください。
２．町屋海岸の砂浜の表面温度が正午に最大になるとします。地下 10 cm に住んでいるバカ貝君は何時頃に温度のピークを感じるでしょうか？式⑦を基に考えてください。
３．金属固体（例えば鉄）と土との熱的な特性の違いを 3 つ以上挙げなさい。
４．式⑤⑤’から式⑥、⑦を導け。

[備考]

表 11-1　主な物質の熱伝導率　（単位は W/m. K）

気体(0℃)		液体(20℃)		溶融金属		金属(20℃)		非金属固体(20～30℃)	
亜硫酸ガス	0.0084	フレオン	0.0728	水銀(0℃)	8.26	クロムニッケル	16	羊毛	0.040
炭酸ガス	0.0145	トランス油	0.124	水銀(200℃)	12.7	鉄	49	絹	0.042
アンモニア	0.0219	スピンドル油	0.144	ナトリウム(93℃)	86.1	鋳鉄	52	のこぐず	0.052
酸素	0.0229	エチレングリコール	0.250	ナトリウム(704℃)	59.3	炭素鋼	53	木綿	0.093
一酸化炭素	0.0233	アンモニア	0.521	鉛(371℃)	16.0	ニッケル鋼	72	ひのき(木材)	0.106
空気	0.0237	水	0.597			黄銅	110	ベークライト	0.233
窒素	0.0241	氷	2.2			ジェラルミン	164	ゴム	0.237
水素	0.1570					アルミニウム	228	コンクリート	0.5～0.6
						金	311	温度計用ガラス	0.97
						銅	386	石英ガラス	1.35
						銀	419	ガラスウール	0.04

表 11-2　主な物質の熱拡散係数　（単位は m^2/s）

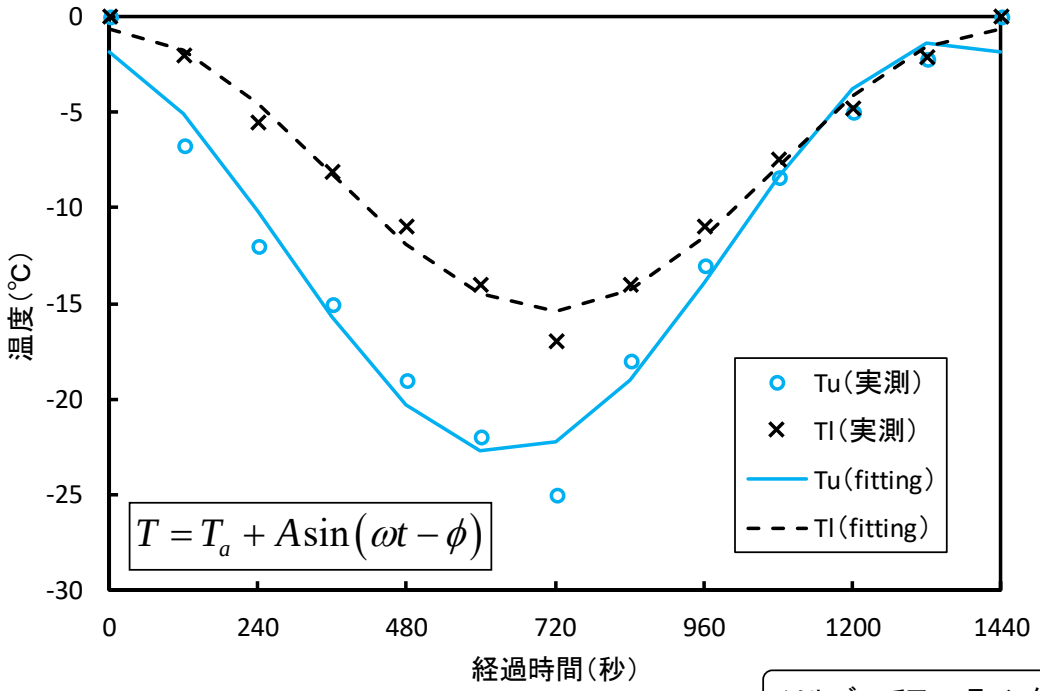
金属		気体		溶融金属		非金属固体		液体	
銀	1.70×10^{-4}	水蒸気	2.28×10^{-5}	水銀	3.33×10^{-6}	氷	1.16×10^{-6}	水	1.47×10^{-7}
金	1.18×10^{-4}	空気	2.17×10^{-5}			コンクリート	4.44×10^{-7}	エチルアルコール	9.44×10^{-8}
銅	1.0×10^{-4}	炭酸ガス	1.08×10^{-5}			ガラス	3.06×10^{-7}	スピンドル油	8.89×10^{-8}
アルミニウム	8.36×10^{-5}					雲母	1.94×10^{-7}	フレオン	8.06×10^{-8}
黄銅	2.78×10^{-5}					ベークライト	1.11×10^{-7}		
ニッケル	2.08×10^{-5}					エボナイト	1.06×10^{-7}		
鉄	1.25×10^{-5}								

熱伝導率も熱拡散係数も気体、液体、非金属、合金、純金属などグループ毎にまとめることができる。熱拡散係数は熱伝導率と熱容量の比なので、熱伝導率が高くても、熱拡散係数が高いわけではない。

［おまけ］

「２．」で選んだ区間は、その選定理由をレポートにも記すこと。なお、一見同じようなグラフに見えても、前半はランプが存在していなかった実験開始前の期間の影響があるため、温度変化の周期性がしっかりしている後半の方が好ましい。

「５．」のグラフから平均温度 T_A や振幅 A はおよそ推定できる（フィッティングの初期値に使える）。また、「６．」でフィッティングした式も「５．」のグラフと一緒に下図のように記載すれば、フィッティングがうまくできているか確認できる。なお、「６．」のフィッティングでは、$A>0$、$-\pi<\phi<\pi$ の範囲があることに気付きたい（ϕ の範囲は t を 0 から考える場合。t を任意の時間から考えても良いが、その際も ϕ_U と ϕ_L の差は 2π を越えない）。



ソルバーでフィッティング

T_A	−12.039	−8.0283
A	10.8549	7.37056
ϕ	−1.9171	−1.5969

実際の時間	秒に換算	Tu（実測）	Tl（実測）	Tu（fitting）	Tl（fitting）	Tu二乗差	Tl二乗差
12	0	0	0	−1.82891	−0.66027	3.344898	0.435955
14	120	−6.7	−2	−5.0392	−1.74375	2.758242	0.065662
16	240	−12	−5.5	−10.1252	−4.51118	3.515004	0.977762
18	360	−15	−8.1	−15.724	−8.22102	0.52419	0.014646
20	480	−19	−11	−20.3355	−11.8792	1.783645	0.773038
22	600	−22	−14	−22.7241	−14.5056	0.524289	0.255613
24	720	−25	−17	−22.2496	−15.3964	7.564487	2.571667
26	840	−18	−14	−19.0393	−14.3129	1.080228	0.09789
28	960	−13	−11	−13.9534	−11.5454	0.908932	0.297511
30	1080	−8.4	−7.5	−8.35454	−7.83561	0.002067	0.112631
32	1200	−5	−4.8	−3.74301	−4.1774	1.580016	0.38763
34	1320	−2.2	−2.1	−1.35447	−1.55105	0.714926	0.301351
36	1440	0	0	−1.82891	−0.66027	3.344898	0.435955
						27.64582	6.727311

二乗和を最少に

１２．土の還元

（１）はじめに

水田土壌や湿地、あるいは河川や湖沼の底質のように大気から遮断された土壌環境では、土壌微生物の活動により酸素が消費され、次第に還元状態が進行する。そして、酸化還元反応に由来する各種の物質変化（形態変化）が生じる（**図 12-1**）。例えば硝酸イオンは脱窒され窒素ガスとなり、鉄などの金属は還元され遊離化し、二酸化炭素や有機酸はメタンに態を変える。土壌微生物の活動により有機物の無機化も生じる。この際、還元の進行は土壌の酸化還元電位を低下し、鉄の還元は土色を青灰色に変化させる。これらの反応は、土壌環境における生物活動を維持するために重要であるばかりでなく、水田における作物生産、土壌圏－水圏―大気圏における物質循環、環境浄化に大きく寄与する。そこで本実験では、湛水土壌を模した土壌の保温静置（incubation）を行い、土壌の還元にともなう酸化還元電位、色、臭い、ガスの発生などの変化を確認し、物質の形態変化について考察する。

なお、土壌元素の植物可給態は、土壌溶液中に溶解している形態（溶存態）と、粘土鉱物の表面に吸着している形態（交換態）の 2 つがある。可給態の栄養元素が土壌中にどれだけ存在しているかは、通常酸性あるいは中性の塩を溶解させた水溶液を土壌に添加し，溶液中に溶解した元素の濃度を測定することによって評価される。例えば、ある栄養（有害）元素について、土壌から溶液中に溶解した量が多ければ、その元素の植物可給性（毒性）は高いということが評価できる。元素の可給性評価に用いられる溶液の種類や濃度は、植物の根から土壌溶液中に分泌される有機酸（例：クエン酸，酢酸）の組成を模擬して考案されている場合が多い。本実験では土壌溶液の抽出や元素組成の定量化は行わないが、興味のある者は土壌学や分析化学の教科書を参照されたい。

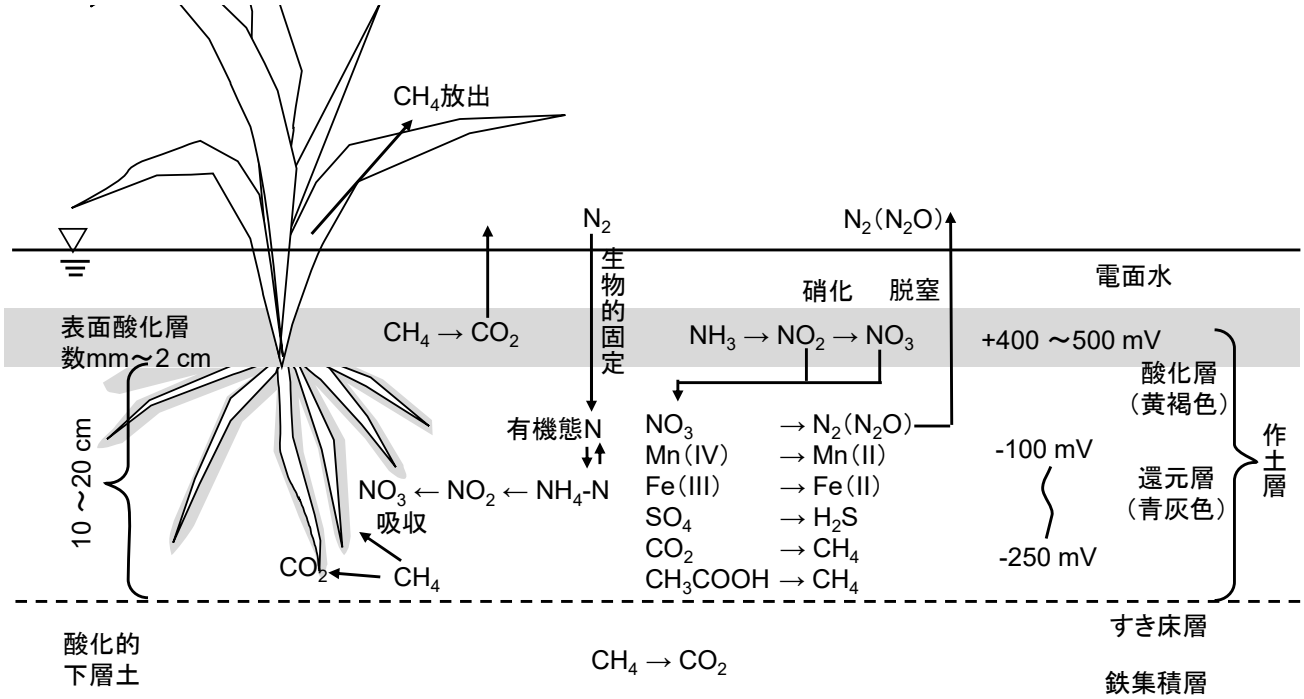


図 12-1　水田土壌断面の形態と酸化還元にともなう物質変化

（２）土壌のインキュベーション

準備するもの

静置容器（遠沈管 or 試験管）	2 本
風船	2 個
メスシリンダ	
土色帳	1 冊
試薬（アラニン）	適量

実験手順

1．アラニンを蒸留水に溶解しアラニン水を作成する。アラニンは微生物の栄養源となるアミノ酸の一種であり分子量は $CH_3CH(NH_2)COOH$ = 89.99 である。容器 1 本当たり 31.8 mg のアラニンが含まれるようにする。
2．容器一本当たり乾燥土壌を 5 g 秤量する（各班で二容器用意します)。
3．アラニン水 10 mL をメスシリンダで測りとり、土壌 5 g と交互に容器にいれる。
4．容器をよく振って泡抜きを行う。
5．土壌の色 [1)]や臭いなどを観察する。
6．可能なら酸化還元電位も測定する。あまり深く刺してセンサ上部を汚さないように注意する。測定ごとにセンサ部を洗浄ビンの水道水で洗浄し（土を流しに流さないこと。必ずバットの中で洗うこと)。使用後はセンサ立てに立てておくこと（横にしない)。
7．容器に風船をかぶせ、一本は 30℃、もう一本は 5℃でインキュベートする。

（３）還元土壌の観察

1．風船の口を容器と指でしっかり押さえ、土壌中に発生したメタンや二酸化炭素を追い出すように左右に振る。
2．風船の口を指でつまみ、空気が漏れないようにして試験管から外す。
3．水上置換法により発生した気体の体積を測定する。
4．30℃と 5℃でインキュベートした土壌の様子を比較する。それぞれの土壌をスケッチし、インキュベートしたことによる、色 [1)]、におい、ガスの発生などあらゆる変化を観察する。
5．両試料の酸化還元電位を測定する。
（6．フェナトロリン比色法あるいはパックテストによる鉄の定量)

[注意]

1) 土色の判定については「１３．圃場の断面調査」を参照のこと

課題

1．物質の酸化・還元について酸素ならびに電子の授受によって説明する。
2．インキュベーション前後の土壌の変化と、インキュベーション温度による違いをまとめ、それぞれの変化が何を意味しているか、土壌の還元機構にもとづき考察する。

１３．圃場の断面調査

（１）はじめに

これまで、様々な土壌の物理・生化学特性を測定してきました。土壌についてわかることは室内実験だけでも沢山あり、これらの実験や測定は、土壌中で生じる様々な現象を扱う上で非常に重要な意味を持っています。しかし、実際の土壌は非常に不均一・非等方であり、そこで起こる現象は複雑です。また、実験室レベルではなかなか見えてこないような現象も多々あります。そこで本実験では実際に現場へ赴き、土壌の現地調査を行います。ピット作業を通し、層位の区分、土色、土壌構造などを調べ、土壌調査法の一端に触れてください。また、それぞれの室内実験と実際の現場の繋がりについて考えて頂きたいと思います。

（２）断面調査法

土壌の断面調査法は一般的な土壌学の記載に準じます。現地に行く前に、各自以下の資料や図書館などを利用して調査法を予習しておくこと。現地ではテキストを読んでいる時間はありません。

＜ピット掘削と断面調査＞

準備するもの（一例）

実験ノート	各自持参すること	
断面調査票	本テキスト付録（HP からダウンロード、コピー、自作も可）	
スコップ	孔を掘ります	6 本
移植ごて		3 個
100cc サンプラー	土を採取します	20 個
木づち	土が硬いときにサンプラーを押し込みます	3 個
2 cm 厚程度の木板	土が硬いときにサンプラーを押し込みます	3 個
土壌ナイフ(カッター)	サンプラー上下を成型します	6 個
包丁		6 個
山中式硬度計	硬度測定用	3 個
土色帳	土色を特定します	3 冊
カメラ	断面の写真その他を記録します	1 個
巻き尺・コンベックス・折尺		
ビニルテープ	サンプラー用	
救急箱	緊急用	1 式

作業手順

＜土壌断面の作成＞

地面を掘り下げ、土壌を観察するための垂直な断面（土壌断面）を切りだします。土壌断面は、一般に傾斜地では斜面に直角な面を、平坦な地では日光がムラなく当たる面を選びます。土壌調査用の標準断面は幅 1m 深さ 1～1.5m 程度（**図 13-1**）です。掘るときには、土壌の硬軟、粘り具合、石礫や根の分布の概略をつかむようにしましょう。

土壌断面観察用の穴を土壌ピット（あるいは単にピット）と呼びます。堀り上げた土は作土、上部心土、下部心土を別にしておき、調査終了後、元通りに埋め戻してください。また土壌断面周囲を必要以上に踏み荒らし、表層の自然状態を乱すことがないように注意すること。

＜断面調査＞

ピットの素堀りが終ったら、断面を包丁や土壌ナイフ等で平らにし（成型）、調査を始めます。各自調査票記入例を参考に、調査票の各項目（断面のスケッチ、層位、土色、根の整理、土性、水分状態、硬度など）を埋めてください。

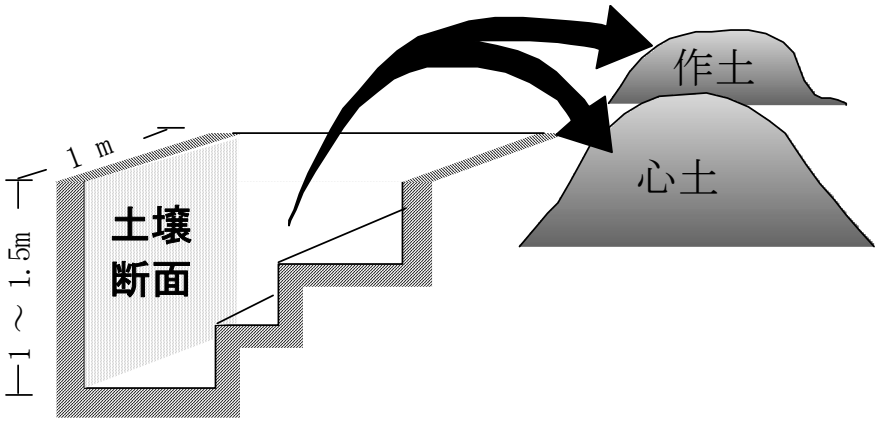


図 13-1　ピットの堀り方

結果のまとめとレポート

「表紙」、「調査現場の土壌について分かったこと（A4 で 1 枚に文章でまとめる：断面調査票の各項目の解釈を含む)」、「作成した断面調査票」、「実習の感想」をとじて提出してください。

○スケッチと写真撮影

土壌断面ができたら、断面の写真を撮ります。写真は、スケール（折尺や巻き尺）を断面左側に立てかけ、調査年月日等を記載した札を置き撮影します。土壌断面だけでなく、周囲の地形や植生の写真を撮っておくのも大切です。

続いて、断面のスケッチをします（**図 13-2**)。層の状態、層位の推移状態、石や礫・根の分布などの土壌の特徴をよくつかんで書くことが重要です。色鉛筆などを用いるのもよいでしょう。また、調査地付近の環境、地形などの情報も合わせて記すようにします。

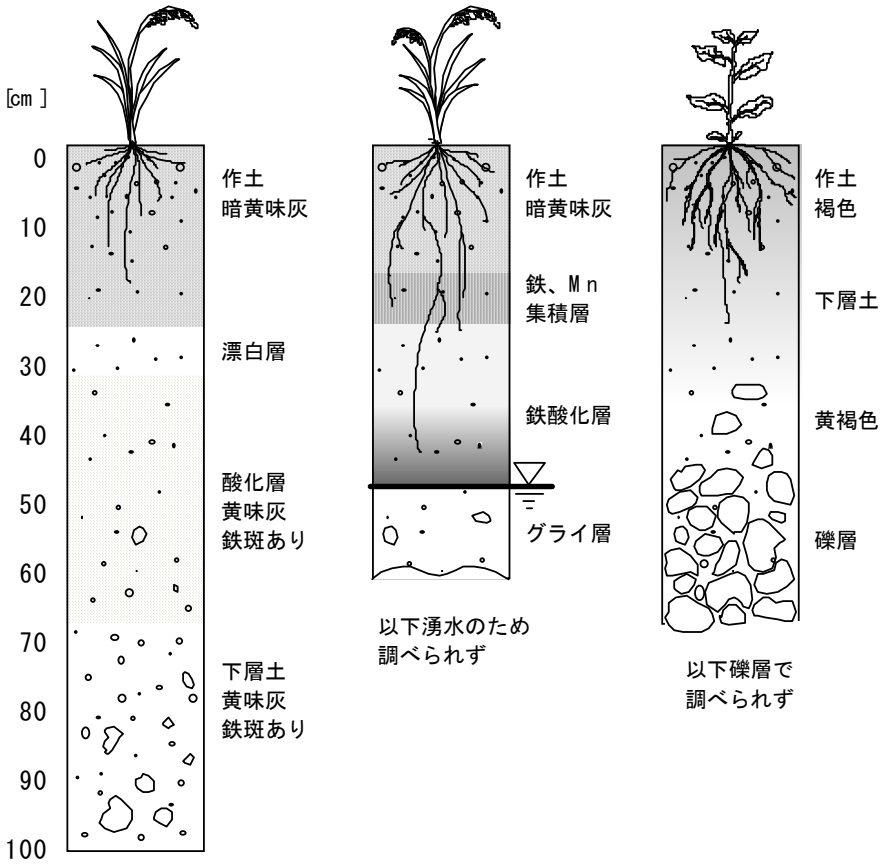


図 13-2　土壌断面のスケッチ例

○層位と層界

土壌は、色、硬さ、手触り、根の分布などの性質が違った層が、地表面におおよそ平行に積み重なってできています。これらの層を層位（あるいは土壌層位）とよびます。土壌は一般に上から順に A 層、B 層、C 層といった 3 つの主層位からなります。

C 層は土壌の無機質材料（母材）です。A 層は母材に生物の影響が加わって生成した層であり、腐植のために黒っぽく見えます。B 層は C 層と A 層の中間的な層であり、中間的な性質を示します。

しかし、実際には A、B、C の各主層位の特徴や性質は変化に富んでいます。そこで、こうした特徴や性質を区別するために、主層位の記号 A、B、C に続いて数字や文字（小文字）を添えて、いくつかの亜層位を細分します（**表 13-1**）。

こうした層位がどのくらいの厚さなのか（層厚）？また、層位と層位の境界（層界）はどうなっているのか？なども土壌の重要な情報です。層界は、例えば、そこを境に土壌の物理性や化学性、生物の影響が急激に変化していることを示します。そこで、土壌断面調査票には、層位の区分と同時に層厚、層界（**表 13-2**）もわかるように記載してください。

表 13-2　層位の区分（主層位）

主層位(master horizon)	
L	植物組織の原形が明瞭に認められる、新鮮な落葉落枝の層。
F	部分的に分解されて細くなった前年の落葉落枝からなる層。
H	未分解または分解した植物遺体の有機質層。水面下で形成されたもので、水で飽和されていることが多い。泥炭、あるいは黒泥とも呼ばれる。（UNESCO,USDA では O 層）
O	未分解または分解した植物遺体からなる有機質層のうち泥炭以外の層。水で飽和されることはほとんどない。（FAO/UNESCO, SSSA では H 層）
A	表層又は O 層の下に生成された無機質層。起源の岩石や堆積物の組織を失い、かつ次の 1 つ以上の特徴を持つもの。 ・無機質部分とよく混合、腐植化した有機物が集積し、かつ E または B 層の特徴を持たない。 ・耕転、放牧、または同様の撹乱の結果生じた性質。 ・表層撹乱作用の結果生じた下位の B または C 層と異る形状。
E	珪酸塩粘土、鉄、Al が溶脱し、砂とシルトが残留富化し、また起源の岩石や堆積物の組織を失った淡色の無機質層。普通 O または A 層と B 層の間にある。
B	A、E、O または H 層の下に形成された無機質層。起源の岩石または堆積物の組織を失い、かつ次の 1 つ以上の特徴を持つもの。 ・A、E 層から溶脱した珪酸塩粘土、鉄、Al、腐植、炭酸塩、石膏、珪酸の集積富化。 ・炭酸塩が溶脱した証拠。 ・鉄や Al の酸化物の残留富化。 土粒子を鉄や Al の酸化物が被覆していて、上下の層位より明度が著しく低いか、彩度が高いか、または色相が赤い。 ・珪酸塩粘土、遊離酸化物の生成と粒状、塊状、柱状構造の発達。
C	土壌の母材となる岩石の物理的風化層または非固結堆積物層。ほかの主層位の特徴を持たない。上位の層位から溶脱したもののの集積でなければ、珪酸、炭酸塩、石膏、鉄酸化物などの集積層は C 層になる。
G	強還元状態を示し、ジピリジル反応が即時鮮明なグライ層。干拓地のヘドロのように、ジピリジル反応は弱くても、水でほぼ飽和され、土塊を握りしめたとき土が指の間から容易にはみ出すほど軟らかく、色相が 10YR よりも青灰色の層も含む。日本特有の用法で、FAO/ISRIC の方式では Cr 層にほぼ相当する。
R	土壌の下の硬い基岩（母岩）。岩の塊を水中に 24 時間浸してもゆるまず、固くてスコップで掘ることはできない。亀裂を伴うことがあるのは非常にまれで、根は殆ど入ることはできない。

表 13-2　層位の区分（続き）

主層位の付随的特徴（主層位記号に添える）

a	良く分解した有機質層。
b	埋没生成層位。埋没した土壌生成的層位。有機質土壌には使わない。
c	結核またはノジュールの集積。ふつう構成成分を表す添字を併記する。
d	物理的根の伸長阻害。
e	分解が中程度の有機物物質。
f	凍土。
g	グライ化。季節的停滞水による酸化・還元の反復により三二酸化物の斑紋を生じた層。
h	有機物の集積。無機物層における有機物層の集積を表す。
i	分解の弱い有機質物質。
j	ジャイロサイト斑紋の出現。
k	炭酸塩の集積。
m	固結または硬化。
n	ナトリウムの集積。交換性ナトリウムの集積を表す。
o	三二酸化物の残留集積。
p	耕転などの撹乱。耕起作業による表層の撹乱を表す。
q	珪酸の集積。二次的珪酸の集積を表す。
r	強還元。地下水または停滞水による連続的飽和の下で、強還元状態が生成または保持されていることを示す。
s	三二酸化物の移動集積。有機物-三二酸化物複合体の移動集積を表す。
t	珪酸塩粘土の集積。
v	プリンサイトの出現。湿状態で硬く、空気にさらされると不可逆的に固結する鉄に富み腐植に乏しい物質の存在を示す。
w	色または構造の発達。
x	フラジパン物質の形質。
y	石膏の集積
z	石膏より溶けやすい塩の集積。
ir	斑鉄の集積。（日本独自の記号。水田土壌の生成過程において重要。常に g を伴う。）
mn	マンガン斑・結核の集積。（同上）

表 13-2　層界の明瞭度と形状

明瞭度	層界の幅	記号	形　状	層界の起伏	記号
画　然	1cm 以内	━━━━	平　坦	ほとんど平面	――――
明　瞭	1 ～ 3cm	――――	波　状	凹凸の深さが幅より小	∧∧∧
判　然	3 ～ 5cm	――●――	不規則	凹凸の深さが幅より大	⎍⎍⎍
漸　変	5cm 以上	……	不連続	層位が不連続	―×―×―

○土色

土色は最も重要な土壌の形態的特徴の一つであり、物理性、化学性、生物的性質と密接に関連しています。土色は土色帖（マンセル表色系に準じる）を用い、色相、明度、彩度の三属性に注意して判定してください。土色の決定はムラのない明るい光線の下で次の手順でしたがって行います。

① 土壌をろ紙や指の上に載せる．土色帳の上に容易に移動できるくらいの大きさがよい．
② 色相（Hue）を決定する．この作業により土色帳の該当ページが決まる．
③ 明度（Value）と彩度（Chroma）を比較しながら，最も近い色を決定する．
④ 決定した色は，Hue/Value/Chroma の順に記述（例，10YR/7/3）

標本色と土壌の色が一致することはほとんどありません。そこで、平均的な色を選ぶようにします。中間の場合、例えば明度が 5 と 6 の中間であれば、5.5 のように標記すします。色相や彩度についても同様です。土壌の状態が乾燥であるか湿潤であるかを記録することも重要です。一般に、明度は乾いた土の方が高く、彩度と色相は土の乾湿にはあまり依存しません。

○土性

土粒子は粒径によって

礫	粒径 2mm 以上	（水をほとんど保持しない）
粗砂	2～0.2mm	（毛管水を保持する）
細砂	0.2～0.02mm	（同上。目で確認できる限界サイズ）
シルト	0.02～0.002mm	（凝集して土塊を形成する）
粘土	0.002mm 以下	（コロイド的性質を持つ）

と 5 段階に区分されます。土性は、細土（2mm 以下）の土壌の組成のことをさし、砂、シルト、粘土の重量分率によって**図 13-3** のように区分されています。

土性区分	略号
砂土	S
壌質砂土	LS
砂壌土	SL
壌土	L
シルト質壌土	SiL
砂質埴壌土	SCL
埴壌土	CL
シルト質埴壌土	SiCL
砂質埴土	SC
軽埴土	LiC
シルト質埴土	SIC
重埴土	HC

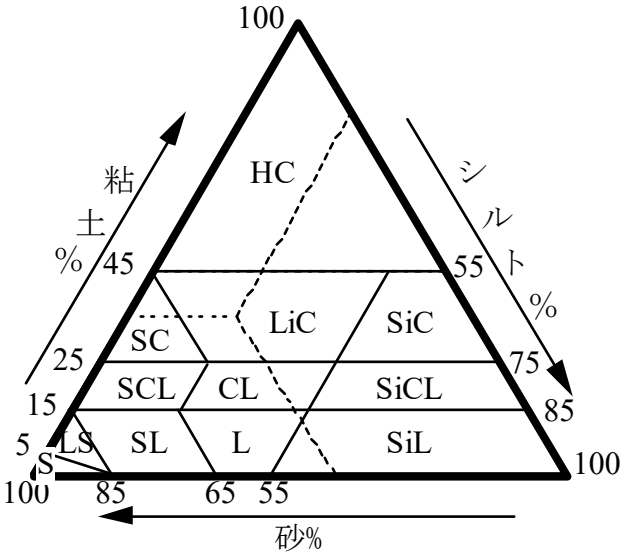


図 16-3　土性三角図表

土性の正確な判定は、室内での実験を要しますが、野外では手触りや見た感じからおおまかに判定します（**表 13-3**）。

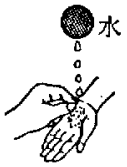
表 13-3　野外土壌判定の目安

判定法	土性名
ほとんど砂ばかりで粘りけを全く感じない。	砂土(S)
砂の感じが強く、粘りけはわずかしかない。	砂壌土(SL)
ある程度砂を感じ、粘りけもある。砂と粘土が同じくらいに感じられる。	壌土(L)
砂はあまり感じないが、サラサラした小麦粉のような感触がある。	シルト質壌土(SiL)
わずかに砂を感じるが、かなり粘る。	埴壌土(CL)
ほとんど砂を感じないで、よく粘る。	重埴土(HC)

【簡易的な土性の判定】 前田，松尾，図解土壌の基礎知識（農山漁村文化協会）

第8-4図　土性の判定

土を少量の水でしめらし指の感じによって粘土と砂の量をきめる



現地で粘土と砂との割合の感じ方	分析による粘土%	記号	区分	粘土細工で土性を判定
ザラザラとほとんど砂だけの感じ	12.5%以下	S	砂土	棒にもハシにもならない
大部分（70～80%）砂の感じでわずかに粘土を感じる	12.5～25.0	SL	砂壌土	棒にはできない
砂と粘土が半々の感じ	25.0～37.5	L	壌土	鉛筆くらいの太さにできる
大部分粘土で一部（20～30%）砂を感じる	37.5～50.0	CL	埴壌土	マッチ棒くらいの太さにできる
ほとんど砂を感じないでヌルヌルした粘土の感じが強い	50%以上	C	埴土	コヨリのように細長くなる

○礫

礫は土壌に含まれる直径2mm以上の鉱物質粒子をさします。礫については、岩質、風化の程度、大きさ、形状、含量などを記載してください。岩質は、構成物質をルーペなどで観察し、標本や図鑑から判断します。風化の程度は、もとの岩石の硬度と色を保つもの（未風化）；多少変質しているが、なお硬度を保つもの（半風化）；手でなんとか砕ける程度に風化しているもの（風化）；スコップで簡単に削れる程度に風化しているもの（腐朽）の4段階に区別します。

○腐植

腐植は、動植物の遺体が土壌中で生物的に分解されたのち、これらの分解生成物が重縮合してできた暗色の比較的安定な高分子化合物をさします。未分解の根や破片は含みません。腐植含量は土壌の物理化学的、生物的性質や土壌の肥沃性を大きく支配する要因です。

腐植の多い少ないは、土の色の黒味と触感の柔らかさ、あるいは腐り具合から総合的に判断してください。正確に腐植含量を判定するには、室内実験が必要ですが、現場ではたとえば土色帖の明度から、**表13-4**のように区分したりもします。

表 4　腐植含量の目安

区　分	腐植含量	土色（明度）
あ　り	2% 以下	明　　色　（5 ～ 7）
含　む	2 ～ 5%	やや　暗色　（4 ～ 5）
富　む	5 ～10%	黒　　色　（2 ～ 3）
すこぶる富む	10 ～20%	著しく黒色　（1 ～ 2）
腐植土	20% 以上	真　っ　黒　（2 以下）

○構造

土壌は、砂や粘土の粒子がバラバラに詰まっているのではなく、乾燥や湿潤、植物の根や土壌動物の活動などの作用でいろいろな大きさの形の集合体（ペット）を形成しています。これを土壌構造といいます。土壌構造は一般に大きさ、形状（団粒状、粒状、角塊状、亜角塊状、板状、柱状、単粒状、壁状など）、内部の緻密度（強度、中度、弱度など）を区分します。

土壌構造には同一の層位の中にいくつかのものが混じり合っていたり、ある構造が集合して二次的な構造を形成していることもあります。こうした主構造と副構造や一次構造と二次構造の違いも一緒に区別するようにします。

○孔隙

孔隙は、土の隙間や亀裂を指します。見た感じで隙間や亀裂の大きさ、量、形状、連続性、方向性などを判断します。孔隙の大きさと量については、**表 13-5** のような判断基準が用いられることもあります。

表 5　孔隙の大きさと量

区　分	孔隙径
細	0.1～0.5mm
小	0.5～ 2 mm
中	2　～ 5 mm
粗	5mm 以上

区　分	亀裂幅
狭　小	1mm 以下
中　幅	1～ 3mm
幅　広	3～ 5mm
極幅広	5～10mm

区分	2.5cm^2 あたりの量
なし	—
あり	1～ 3 個
含む	4～14 個
富む	15 個以上

○硬度

硬度は山中式硬度計で測定します。山中式硬度計では土壌の硬度が mm で表されます。なお、土の硬度や緻密度は指や手のひらで押したり、握ったり、潰したりした感じから測定することも多々あります。いろいろ試してみるとよいでしょう。なお、親指の貫入程度と山中式硬度計には**表 13-6** のような関係があると言われています。

表 13-6　硬度計計測値と親指貫入程度

区分	山中式硬計	親指貫入程度
極粗	10 mm 以下	ほとんど抵抗なく指が貫入する。
粗	11～15 mm	やや抵抗はあるが貫入する。
	15～18 mm	第一関節以上はかなりの抵抗はあるが貫入する。
中	18～20 mm	第一関節まで貫入する。
	20～24 mm	かなりの抵抗があり、貫入せずへこむ程度。
密	25～28 mm	指あとはつくが貫入しない。
極密	29 mm 以上	指あともつかない。

○透水性、粘着性、可塑性など

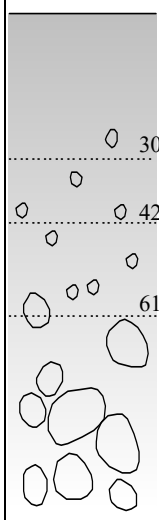
透水性は隙間の多少や亀裂の有無などに注意して考えます。可能であれば、減水深から測定することもあります。粘着性や可塑性は土に少量の水を加え、パチンコ玉程度の団子をつくり、これをもみ伸ばした加減から判断します。

○その他

他に気づいたことをセンス良く記載し、土壌断面調査票を完成しましょう。

［付録］　断面調査表の記載例

土壌断面調査票　（例）

番号		調査地点	紀伊・黒潮ﾌｨｰﾙﾄﾞｻｲｴﾝｽｾﾝﾀｰ			地目	農場（野菜畑）			天候	晴れ		調査前の天候	晴れ
傾斜	1度	侵食		地形	洪積台地中位面			地質	洪積層		母岩 堆積様式	非固結堆積岩		
断面スケッチ		深さ 層界	層位	土性	礫	腐食	泥炭	色	構造	孔隙	斑紋	硬度	透水性	粘着性	湧水面	根の状態	備考
		0 -20 -40 -60 -80 -100	A1	SC	細小円礫あり	富む	―	5YR 3/3	団粒状	少	なし	16	良	小		細小富む	みみず多数
			B1	LiS	同上含む	含む	―	7YR 3/2.5	粒状	中	なし	18	中	中		細小含む	
			B2	HC	同上富む一部風化	なし	―	7.5YR 4/4	五角塊状	中	Mn点状 2～3%	25	中	中		細小あり	
			B2g	HC	細～中の円礫富む	なし	―	10YR 5/6	壁状	多	Mn点状 5～8%	29 32	良	中		なし	
作(植)物の生育状況			ササ、クロマツ										土壌統	黒ぼく土			

2015年　　7月　17日　13-15 時　　調査者　　循環　学

土壌断面調査票

番号		調査地点				地目		天候		調査前の天候	
傾斜		侵食		地形		地質		母岩 堆積様式			

断面スケッチ	深さ 層界	層位	土性	礫	腐食	泥炭	色	構造	孔隙	斑紋	硬度	透水性	粘着性	湧水面	根の状態	備考
	−0 ・ − ・ −20 ・ − ・ −40 ・ − ・ −60 ・ − ・ −80 ・ − ・ −100															

作(植)物の生育状況		土壌統	

年　　月　　日　　時 調査者