

Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan

土 壌 の 物 理 性

第13号

昭和40年9月

御挨拶をかねて.....	会長 吉 良 芳 夫	
土の弾性・粘性・塑性.....	須 藤 清 次	1
土壌の易耕性.....	木 下 彰	13
耕起法のちがいが土壌の理化学性に及ぼす影響.....	石 井 和 夫	26
水田転換ミカン園土壌の物理性について.....	丹 原 一 寛	45
土壌水運動理論の諸系列—その内容と評価— (I).....	田 淵 俊 雄・中 野 政 詩	54

土 壌 物 理 研 究 会

東京都世田谷区世田谷4丁目 東京農業大学農業機械研究室内

土壌物理研究会会則

- 第1条 本会は土壌物理研究会と称する。
- 第2条 本会は土壌の物理性を中心とする試験研究の発展と農業技術への貢献を図ることを目的とする。
- 第3条 本会はその目的を達成するため次の事業を行なう。
- 1 研究発表会、討論会及び見学会などの開催
 - 2 土壌の物理性 (Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan 会誌という) 並びにその他の印刷物の発行
 - 3 内外の研究、技術の交流及び他の学会、諸団体との協力
 - 4 その他本会の目的を達成するため必要な事業
- 第4条 本会の会員は正会員及び賛助会員の2種とする。
- 第5条 会員は次の会費を所定の期日までに納めるものとする。
- 正会員 年額 300円
- 賛助会員 1口年額 5,000円
- 第6条 本会に次の役員をおく。
- 会長1名、副会長1名、評議員若干名及び幹事若干名。役員を選出は総会において行ないその任期は1年とする。但し再任をきまたげない。
- 第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。
- 第8条 本会の経費は会費その他の収入をもつてあてる。
- 第9条 本会の会務執行に必要な規定は別に定める。
- 付 本会の事務局は当分の間下記におく
- (昭和40年4月以降)
- 東京都世田谷区世田谷4丁目
- 東京農業大学農業機械研究室内

「土壌の物理性」投稿規定

- (1) 投稿は本会会員に限る。ただし共著者の場合または編集委員会が依頼した場合はこの限りではない。
- (2) 原稿の採否は編集委員会が決定する。編集委員会は要すれば文章の加除修正を行なう。ただし内容についてはこれを著者に依頼することがある。
- (3) 投稿には400字詰横書きの原稿用紙を用い、用語、図表等は関係学術雑誌の規定にならつて執筆すること。
- 枚数は16枚程度を一応の規準とする。
- (4) 投稿は以下に示す種別にしたがい、その内容は土壌の物理性に主体をおくものとする。
- 《報文》 他誌に未発表のものに限る。書き方は方法、結果、考察ならびに総括(摘要)の体裁をとり、引用文献を明らかにすること。
- 《論説・綜説》 土壌の物理性に主眼をおき、広い視野に立つて記述したもの。
- 《資料》 既に発表した報文または発表予定の内容を各分野の参考資料となるよう書き改めたもの。
- 《解説》 物理性に関する諸事項の理解を計るための平易な解説ならびに研究技術の普及交換を進めるための紹介を含む。
- (5) 原稿には下記形式の送状をつける。報文のみ初刷りは著者校正とし、印刷済みの原稿は返さない。

発送年月日		受付年月日	
種別		原稿枚数	
表題		図表数	図枚表枚
著者名		写真数	葉
所属		別刷	30部+部

- (6) 別刷は30部を著者に贈呈する。それ以上希望する場合は実費を申し受ける。

付記：投稿及び会誌編集に関する通信は下記宛のこと

東京都世田谷区世田谷4丁目 東京農業大学農業機械研究室内 土壌物理研究会編集委員会

御挨拶をかねて

会長 吉 良 芳 夫

本会が昭和33年春発足し、昭和34年3月機関誌「土壌の物理性」第1号が発刊されました当時の正会員はわずか140名で会の運営には資金面その他色々な面において非常な困難を伴ない、初代会長山中金次郎氏を初め事務局役員各位の御善心は並々ならぬものがあつたことと推察致します。しかし会長初め各役員の昼夜をわかたぬ御努力と会員各位の絶大なる御支援のもとに着々とその基礎を固められ、ようやく研究会の前途に明るい見透しが得られるようになりました。昭和37年一層の発展を期し事務局が京都大学に移され、会長も川口桂三郎氏に引き継がれました。爾来会長以下幹事の方々の意欲的御努力により会員も農業の各分野にわたつて急速に伸び現在正会員数727名に達し確固たる基礎が固められるにいたりました。これ一重にこれまでの会長ならびに事務当局の御努力の賜と深く感謝いたす次第であります。

今回研究会の事務局が再び東京に移されることになり、はからずも私が会長をお引受けすることになりましたが、これは誠に光榮の至りではありますが、一面その任に堪え得るやいなやについては甚だ不安に感ずる次第であります。しかしお引受けした以上これまでに築きあげられた隆盛をくずすことなく更に一層の発展を期し努力いたしたいと存じますので会員各位の強力な御支援をお願いいたす次第であります。

近年土壌物理の重要性が広く認識されてきましたが、本研究会は開設当初より農業の各分野に対しその生産性との有機的連関に絶えず留意し、純粋の基礎的研究も各分野に貢献出来るよう視野を広くとることをモットーとしてきたのでありまして、本会の特徴は農業の各分野にわたつて会員をもっていることで

あります。この意味からこれまで、水田の透水性，土壤侵食，土壤改良剤とその利用，土壤の圧縮性および鋤床層の生成，土壤物理性の測定法，等のテーマを取り上げて討論会をもち会誌13号まで編集されてまいりました。今後この基本の方針を踏襲して一層の発展を期したいと存じますので，会員各位の積極的御支援をお願いいたしたいと存じます。

なお近年農業機械化の問題が大きくなり上げられてまいりましたので才7回土壤物理研究討論会のテーマを「農業機械と土壤の物理性」(1. 土壤のティルス(易耕性)，2. 走行能，3. 土壤水分と硬さ)として11月17日東京農業大学において開催することになりましたので多数会員の御参加をお願いいたします。

以上甚だ不束ながら，所感の一端を述べて御挨拶と致したいと存じます。

土の弾性・粘性・塑性

山形大農 須藤清次

土の力学的性質は土木・農業で古くから取扱われてきた。したがって技術的にはそれぞれの場合の取扱い方や計算法が行なわれてはいるが、理論的にみればそれらは体系だてられていないから新しい技術的課題にたいしては有効性が少ない。そこで土の変形・流動を土の理化学的性質を考慮しつゝ体系的記述を試みる。

I 土のとらえかた

1. 連続体と粒子系

一般に材料の力学は連続体 (continuum) の力学として体系化されて実用的課題に応えてきた。そのあとで物性論の誕生により、材料を構成する粒子 (原子、分子) 間の相互関係から材料の力学的性質が研究されるようになった。ところが土の力学はそれとは逆にまず粒子系 (particle system) として出発し、あとから連続体の力学が取り入れられた。土を構成する粘土・砂は粗粒子であるから、それらの粒子間の関係は古典的・初歩的法則によつて表わすことができる。そのために鉄や水などの力学のような発展過程をとらず逆に粒子系から出発したものであろう。

古典的に表わされた粒子間の関係は簡明ではあるが、それから推論するときにはもとの原理の適用範囲を知つていなければならぬ。たとえば、土の摩擦抵抗 S を固体間の外部摩擦法則 (クーロン則, 1773~1801) $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$ (c : 粘着力, ϕ : 摩擦角) により取扱うとき、土の変形においてポアソン比は一般にかなり大きいから図1の面力 (traction) σ_n だけでなく側方の条件により τ_f の値はことなつてこよう。

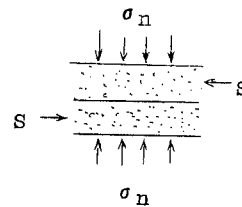


図-1

また粒子間の凝集力を毛管力理論 (ラプラス・ヤング1804, ヘインズ1925) により解釈しようとするときは、普通の水は常温で $pF > 3$ の相圧による液体は存在し得ないから、強い凝集力には毛管力理論は適用することができない。

土を連続体としてとらえるときはマスをとしての土の弾性・粘性に基づく現象すなわち変形・

流動を定量的に表わすことができる。その場合には粒子の性質は問わないで変形・流動に関する物理常数（弾性率、粘性率、降伏値など）がわかればよい。しかし土の力学的性質を変えようとする場合には粒子間の関係がわからなければ方針が出ない。粒子系の性質はこのような意味において土壌学の一つの課題となろう。

前述の固体摩擦や毛管力は土の強度すなわち塑性の限界（降伏）の問題である。土ではたしかに降伏による塑性変形や破断が大きな問題であるが、場合によつては弾性変形も問題になりうるし、とくに降伏前・後の粘性は無視し得ない役割を占めている。

毛管力を取上げるときは引張り強度の問題が多いが、土では一般には圧縮にたいする抵抗とずり抵抗が課題になる。したがって圧縮やずりを粒子系でどう取扱うかが重要であるが、これらは今後の課題であつてわれわれはまだ十分な理解に達していない。

2. 連続体としての土の挙動

金属材料では普通は応力と歪の関係で弾性が大きな課題であるが、土では粘弾性 (visco-elasticity) を無視することはできない。

粘弾性挙動では後述 (II-2) するように粘性要素が弾性要素に並列または直列に加わる。粘性が直列に加わると (マクスウェル) 液体のようにも考えられるが、液体的か固体的かは η_M の大きさ (厳密にいえば η_M / G_M の大きさ) によつてきまる。フォークト模型はいかにも硬く固体的にもみえるが、フォークト模型はかならずしも硬いことや固体的であることを意味しない。たとえばフォークト模型は柔らかい土壌ペーストの挙動を表わし、マクスウェル要素は液性限界より硬くなつたときに土の力学的模型のなかに入つくる。

長いタイム・スケール (time scale) でみればフォークト体は固体にみえ、短いタイム・

スケールでみれば液体にみえる。またマクスウェル体はその逆になる。液体的か固体的かは観測時間の問題であるわけである。タイム・スケールは η_K / G_K , η_M / G_M できまる。それぞれの比は定荷重での歪 (strain) の遅延 (retardation) と定歪での応力 (stress) の緩和 (relaxation) の物理的半減期 τ_K , τ_M を表わす。このような観点から土

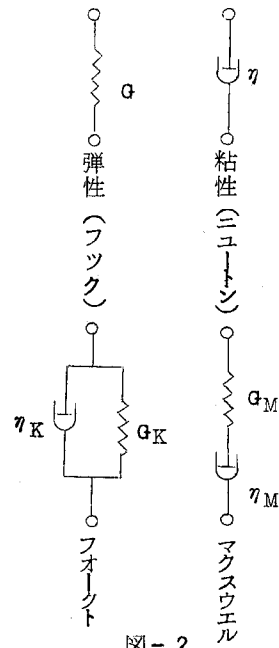


図-2

の力学的性質は次のような四つの方法で認識されよう。

- (i) 形の回復可能な変形すなわち弾性変形(固体)。
- (ii) 不可逆な変形すなわち流動(液体)。
- (iii) 粘弾性体では歪の遅延時間または応力の緩和時間。
- (iv) 固体または粘弾性体の弾性要素の強度すなわち降伏値。さらに降伏後の塑粘性。

3. 粒子系としての性質

粘土・シルトのように水とコロイド系をつくるものと、砂とに大別して考える。

(1) コロイド

土壌コロイドはハイドロ・フオビック・コロイドで、土粒子界面は通常は負電荷をもち分散媒(水)のなかの正イオン界面電気二重層をつくっている。土粒子間には静電的反力による反撥ポテンシャル V_R と粒子間のロンドン力(ファン・

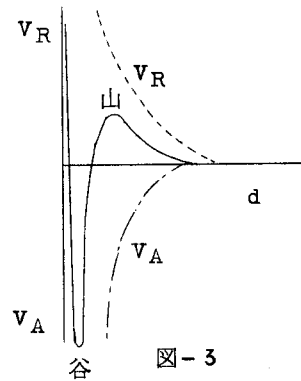
デン・ワールス力)による吸引ポテンシャル V_A とで粒子間の力学的ポテンシャル V がきまる。板形球子では

$$V_R = A_1 \exp(-2Kd), \quad V_A = A_2 / d^2$$

a : 粒子間距離, $1/K$: 拡散二重層の厚さ

$$\text{引力} = \partial V / \partial a, \quad V = V_R + V_A$$

V_R は速く(200Å)まで働らくが V_A は斥力より狭い(20Å)。図3はポテンシャル曲線であるから、粒子間が近づいて曲線を昇るときは抵抗を受け曲線の谷間に



に落ち込んでいれば粒子間が離れようとするときに抵抗をうけて凝集体は安定であることを示す。

ポテンシャルの山が高ければ接近(圧縮)抵抗は大きい。粒子間には拡散二重層以外の要素も考えなければならないのであるが、いま近似的にこの模型で考えるならば土の圧縮挙動は対立イオン(counter ion)の熱運動によるエントロピー弾性であるといえる。この模型では引張り抵抗は無視されるが、実際にも分散した系では引張りは考えない。

その場合は流動に影響する。サスペンションの比粘度 η_{sp} はミセルの体積濃度 ϕ により

$$\eta_{sp} = 2.5\phi + 14.1\phi^2, \quad \eta_{sp} = \frac{\eta}{\eta_0} - 1, \quad \eta_0: \text{分散媒の粘度}$$

で表わされる。

(2) 砂(粗大粒子)

砂の間の関係は前述(I-1.)したクローン・モールの式で表わされているが、厳密な降伏条件はあと(II-3.)で触れる。引張りにたいする抵抗は水の表面張力と負圧によるが、その

場合の適用限界については既に述べた。

クーロン・モールの式による降伏条件(モール, 1900)は土にたいして適用されているが、この式自体は二つの粒子間のずり抵抗の関係である。したがって粗大粒子間の相互関係およびずり強度 τ_f として取扱うときはよいが、一般にある応力状態(テンソル)におかれた土の強度とは別である。

4. 土と他の物体との関係

車輛の走行や耕耘の場合はいま十分に記述し得ない。ここでは付着が問題になるが、それは固体の外部摩擦のような簡単な関係式で表わしうるマクロな現象ではなくミクロな現象であつて、現在行なわれている現象の分析法の範囲ではミクロな分子的挙動には迫り得ないと考えられる。

(1) 摩擦

車輛や鍬に土が付着しないならば、固体の外部摩擦すなわちクーロン則による抵抗がそのままあてはまる。この場合にもマクロな摩擦法則だけでは充分ではない。それは土が σ の増大により軟化(III-1)を起し、その結果摩擦角 ϕ が減少して抵抗 S の増大が緩やかになるからである。

(2) 付着

付着の機構はさておいて、付着が起きている場合には抵抗は土の内部で引起こされる。そのときは土の状態により、土はビンガム流動またはサン・ブナン塑性挙動を起す(II-3)。図4で点線の中の土は動くことになる。

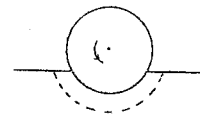


図-4

II 変形・流動の定式

1. 弾性・粘性

固体の歪による抵抗 P は歪の大きさ e に比例する。

$$P = G e \quad G: \text{弾性率}$$

液体の抵抗は歪の起る速度 \dot{e} ($=ae/at$)に比例する。

$$P = \eta \dot{e} \quad \eta: \text{粘性率}$$

これらの式は図2のようにスプリングとダツシュ・ポットにより図形に表象できる。

土のうすいサスペンションは液体とみてよいが、固体とみなせる土は大きい等方圧 (hydrostatic pressure) を受けた砂ぐらいのものである。土は一般に固体とみるのは無理であるが、低次の近以としては固体とみて (大きいタイム・スケールで) 弾性率を求めることがある。

2. 粘 弾 性

簡単な粘弾性はフオークト体とマクスウェル体で (図 2), この二つの型式は粘弾性の呈する二つの力学的特徴である歪の遅延と応力の緩和の典型を示す。

(1) フオークト体

フオークト体の力学的挙動は次式で表わされる。

$$P = G_K \varepsilon + \eta_K \dot{\varepsilon} \quad \text{または} \quad P / G_K = \varepsilon + \tau_K \dot{\varepsilon}$$

$$\tau_K = \eta_K / G_K : \text{歪の遅延時間}$$

図 2 から直観されるように、フオークト体は有限の応力では形の永久変形はないから固体的粘弾性ともいわれる。しかしすでに述べたように固体的か液体的かは観測時間が長いか短いかによりきまるものである。

歪の遅延は次式で表わされ、 τ_K の大きさは PF ≈ 2 で数十秒である (図 5)

$$\varepsilon = \frac{P}{G_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_K}\right) \right]$$

土壌ペーストはフオークト体とみることができる。このとき土壌コロイドはミセルが相互に接触していて自由水は存在しないならゲルでありハイドロ・フィリツク・コロイドとみなしてよいと考えられる。

(2) マクスウェル体

これは次式で表わされる (図 5)。

$$\varepsilon = \frac{P}{G_M} + \frac{P t}{\eta_M} \quad \text{または} \quad G_M \varepsilon = P + \frac{P t}{\tau_M}$$

$$\text{応力緩和は} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_M}\right)$$

$$\tau_M = \eta_M / G_M : \text{応力緩和時間}$$

土壌サスペンションは一般的にはマクスウェル体といえるが弾性項は普通では観測されない。この場合は土粒子の回

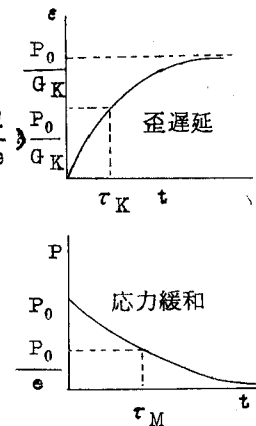


図 - 5

転ブラウン運動による形の恢復が考えられるのである。

土では液性限界より低含水量の状態でもマクスウェル模型が土の力学的挙動のなかに現われてくる(II-2(3))。その場合は土の間隙(pore)により不可逆な変形すなわち粘性流動 η_M が起これと考えられる(アイリングの液体粘性の理論との類似)。弾性変形 G_M は蜂巢構造による偽高弾性である。

固い土に現わる応力緩和時間は $PF \approx 2$ で数十分である(コンクリートは1月、ガラスは1年)。

(3) 土の力学的模型

土の力学的性質は経験的に含水量により三つに大別することができよう。サスペンション・ペースト、固い土である。分子レベルの粒子で構成され物体は等圧の下で状態量(state variable)として温度 T の変化により相転移がきまる。土の力学的性質にみられる上述の三種の状態、二つの転移点(transition point)は等温・等圧の下における土のみかけ体積と含水量の変化によつて起きる。この場合の状態量(内部エネルギー U)の変化を次式によつて考えてみよう。

$$dU = T ds - dw \quad dw = P dv (+dw_0), \quad w_0: \text{ずり仕事}$$

相図は P , T を座標として表わされるから、相変化はエネルギーの強度因子(intensity factor)が指標になるといえる。したがつて等圧下での相変化は P が指標になる。後述(III-3)の降伏現象や振盪によるゾルーゲル転換は dw_0 の力学的作用による転位といえる。

土壌学では μ は比自由エネルギーを表わし、 $PF = \log(-\Delta\mu)$ であるが $-\Delta\mu$ は P と等価であるから、 PF がサスペンション・ペースト・固い土の転移の指標となると考えられよう。

土の力学的模型は含水量(PF)により図6のように分類できる。ただし図6では降伏現象の挙動を示す模型(ビンガム模型)がつけ加えられている。また固い土の符号は E : ヤング率, λ : トルーション粘度, qu : 一軸(単純圧縮)強度の形式にした。他の二つはずり挙動で表わしてある。なお固い土(不飽水)でみられるイニシャル・セット(初期のほとんどの瞬間的な塑性変形)はここでは触れなかつた。

※ 土質工学会シンポジウム(1965年11月)「土の強度」(須藤)参照

須藤・東山・山崎「土のレオロジカルな構造」土と基礎投稿中

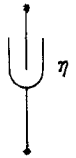
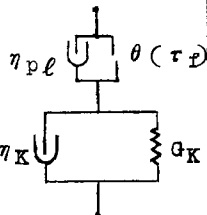
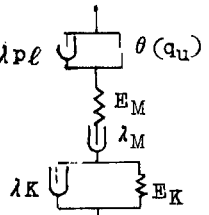
分類	サスペンション	ペースト	固い土
pF	- 1.5		1.5
力学的状態	ニュートン	フォークト	バーガース
模型 (降伏を含む)			
構造	ハイドロ・フォビツクコロイド(ゾル)	ハイドロ・フィリツクコロイド(ゲル)	ゲルを骨格とする蜂巣構造

図 - 6

3. 塑性

(1) 降伏現象

土壌ゲルを振盪してゾル化して分散する現象や湿田のめり込みなどは降伏現象である。その場合に単純ずりであればずり降伏値 τ_f ，単純圧縮であれば一軸圧縮強度 q_u が降伏値 (yield value) となる。単純ずりについては一般的に次のレオロジー方程式で表わされる。

$P_t - \tau_f = \eta_{pl} \dot{\epsilon}$ ， P_t : ずり応力， η_{pl} : 塑粘度
これはビンガム流動の式であつて図7の実線で表わされる。
金属などでは $\eta_{pl} = 0$ の形すなわち $P_t = \tau_f$ となりサン・ブナンの式になる。(図で点線)。

土壌ペーストや液性限界付近の土はビンガム流動するが、液性限界よりはるかに硬い土ではサン・ブナン挙動をすると予想される。降伏は等温下での力学的作用による転移である (レオロジ・ハンドブック, P179)。

降伏値 θ は前述のように pF によりきまると考えらるのであるが、実験的にも降伏値と pF との対応がみられる (図8)

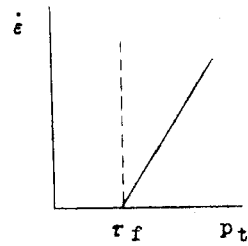


図 - 7

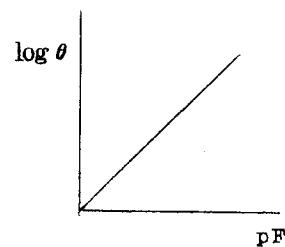


図 - 8

ここで降伏値の対数とPFが等価であるというときに降伏値は τ_f か q_u が明らかでないが τ_f を採用するのが妥当とも考える。理論的には $\tau_f = \frac{q_u}{\sqrt{3}} \approx 0.58 q_u$ (ミゼス・ヘンキー理論)の関係がある。

(2) 降伏条件

降伏の力学的条件は一般的には次のように表わされる。物体は等方圧(球テンソル)の下では降伏しないことは経験から受け入れられる。したがって降伏の原因になるのは応力(テンソル)のずり成分(偏差応力テンソル)である(ミゼス・ヘンキー)。降伏の力学的条件は次式で表わされる S の値に達したときである。ある状態から降伏(転移)点までのエネルギー差はずり仕事量(レジリエンス)に当る。

$$S^2 = \frac{1}{6} [(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2]$$

S^2 : 偏差応力テンソルの二次の不変量

$\sigma_i, i=1, 2, 3$: 各主応力

これは主応力軸に等傾斜の平面に垂直な円筒で、その等傾斜面への射影は図9の円になる。土質力学で普通つかわれているクーロン・モール説は上の円筒に内接する六角筒で図9で点線で表わされる近似的である。前述の実用降伏値は次式で与えられる。

$$\tau_f = S, \quad q_u = \sqrt{3} S \approx 1.73 S$$

多孔質(porous)物体では S は等方圧 σ_m (応力テンソルの一次不変量, $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$)により変化する(シュライヘル・ミゼス, 1926)。

$$S = f(\sigma_m) \approx C_0 + \sigma_m \tan \phi_0$$

これはクーロン・モール則 $\tau_f = C + \sigma \tan \phi$ と同様な意味を表わすが、後者は前者の近似的である($\because S : \tau_f, \sigma_m \approx (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 = \sigma$)。図9で円の半径は σ_m とともに増大することになる。 σ_m は p にあたる。

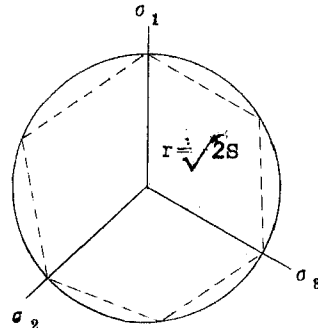


図-9

III 異常粘弾性挙動

いまここでは弾性は応力と歪との関係が直線的であるとして記述してきたが、実際の土の挙動は

直線にはならない。粘性の場合の応力と歪速度も同様に非線型になる。このような現象は応力または歪の変化により常数 G , η に軟化 (softening) や硬化 (hardening) が起こるからである。

(1) 軟化・硬化

自然土は硬いが乱した土が軟くなる場合はよく問題にされる。このようなチクソトロピー (thixotropy) は土の硬い性質を利用しようとするからよく注目されるわけであるが、われわれはこのような軟化よりも硬化につきあたる場合が多い。

含水量が液性限界より高い場合には間隙構造の破壊により間隙水の自由化が行なわれて軟化し、その回復は殆んどない。このような現象は水中で形成された土 (湿田土、瀉土) にみられ、ミクロなカード・ハウス (card-house) 構造や微細な団粒間隙が発達している。

含水量が液性限界より低い場合は、外力の増大過程でのみ軟化を起こす。この場合は定外力を維持すると

少しは回復 (硬化) する。以上からわかるように軟化は含水量は一定であるが外力による

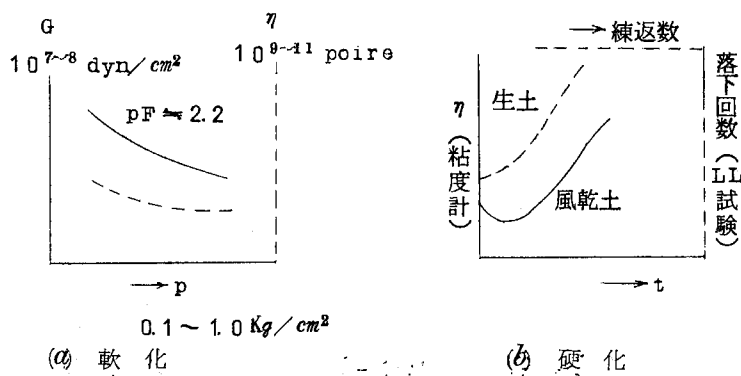


図-10

構造破壊で pF が下がることによつて起きる。

硬化は pF でいえば pF が高くなることに対応する。水に圧力が加わると pF の低下をもたらすから軟化となり、しかし可排水または不飽水系の充填の進行は硬化をもたらす。したがつて非排水の飽水系で硬化が起きる条件はずりによる構造破壊の効果だけとなる。構造のなかに閉じ込められている水は不平衡で一般に外面部分の水より高 pF である。このようなときに外力のずり成分で構造が破れると、系内の水の平衡が促進されて外面の水は高 pF になる。その結果として G , η は硬化を起こす。このような現象が山土、畑土で見られるのは当然であろう。関東ロームの下層土は山土であつても硬化がみられない。それは関東ロームの粘土がアロフェンまたは加水ハロサイトであつて極めて親水性が高く水の平衡が実現しやすいためであろう。

軟化・硬化を応力との関係でまとめると次のようにいえよう。軟化は応力の等方圧成分による

水の圧縮により、硬化は飽水系では応力の偏差（ずり）成分により不飽水系では等方圧成分によつて起きる。多孔質物体では硬化は歪硬化（strain hardening）または加工硬化と呼ばれる。また硬化はその内容からいつて土壌水の不平衡ができるために起きるから速度を伴う現象である。軟化が起きるか硬化が起きるかは応力状態によつてもことなるが、普通は土の状態・構造によつて大体きまることになる。

(2) その他

レオペクシー（rheopexy）はゾルに軽い振動を与えるときゲル化が促進される現象である。これはチクソトロピーの解釈と背反するようにもみえるが、次のように考えれば統一的に理解できよう。ハイドロ・フオビック・コロイドとしてのゾルを前述（I-3(1)）のように拡散電気二重層の模型で考える。ゲル→ゾルの力学的不安定化による自由エネルギーの増大はエントロピー流出（flow）となる。系が原状態に回復するためにはエントロピー流入がなければならないが、これは速度過程の現象である。そのとき攪乱効果を抑えるような振動によりエントロピー生成（production）があるならば原状態への回復が促進される。

海岸や川辺の砂でみられるダイラタンシー（dilatancy）すなわち圧縮による体積膨長はよく経験されることである。ダイラタンシーはずり応力成分により密充填から疎充填になることによつて起こされる。過圧密（over-consolidated）粘土でもダイラタンシーがみられるのは、

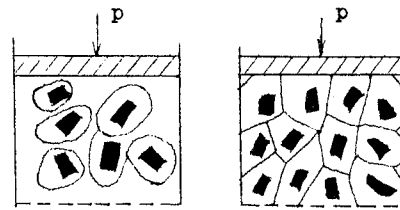


図 - 1 1

過圧密 P_0 による歪硬化で PF すなわち S は高くなり、そのため低い P で圧密するときに P では降伏しないミセルの最密充填の構造ができていたためと考えられる。

IV 測定上の二三の問題

土のコンシステンシーはいろいろな方法で測定されている。そのなかに変形・流動の物理常数の測定を行なっているものもあれば経験的な抵抗の度合を較べているものもある。土を利用するときの境界条件は複雑な場合が多いから、物理常数がわかれば結論が導びかれるというほどには簡単ではない。したがって経験的測定法による実用的役割は大きい。しかしその場合にどんな力学的現象が進んでいるかということを知らなければ経験的測定法の適用を誤るることになる。

1. 力学的常数の測定

図6に示した模型による模型常数(model constant)は次のような方法によつて求めることができる。

i) 回転粘度計: ニュートン模型の粘性率 η , フォークト模型の降伏による塑性流動の常数 τ_f (ずり降伏値)と塑粘度 η_{pl} 。

ii) 一軸圧縮試験: フォークト模型のヤング率 E_k とトルートン粘度(のび粘度) λ_k , パーガス模型のヤング率 $E_M \cdot E_k$ とトルートン粘度 $\lambda_M \cdot \lambda_k$ 。さらにフォークト模型およびパーガス模型の一軸(単純圧縮)強度(降伏値) qu が測定できる。

iii) 三軸圧縮試験: 一軸試験による qu ではシュライヘル・ミゼスの関係 $s=f(\sigma_m)=C_0+\sigma_m \tau \phi$ 。すなわち等方圧 σ_m に伴う強度の変化がつかめないが三軸試験では側圧 σ_3 が可変であるから $\sigma_m (= \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3))$ を変えて $s=f(\sigma_m)$ の曲線が行われる。なお振動粘度計による動的性質の測定については省略する。

ずり挙動の常数 η , G , と圧縮挙動の常数は λ , E , との関係は等性物体では $E=2(1+\nu)G$ であるから, 非圧縮性(ポアソン比 $\nu=0.5$)であれば $E=3G$ で粘性の場合も同様に $\lambda=3\eta$ である。土では $\nu=0.4\sim 0.5$ であるが, 上の三倍則は実用的には使用してよい。

2. 経験的方法

土の抵抗を測るための経験的方法としては貫入抵抗(各種ペネトロメーター, 落下N値など)を測るものと圧縮抵抗(載荷式・落下式)を測るものがある。

前者には圧縮強度・圧縮弾性・固体の接触摩擦・粘性・緩和時間が関係し, 后者にはイニシャル・セツト(initial set), 圧縮強度・遅延時間が関係する。経験的方法は複雑な応力分布での挙動を総合的に計っているので特定の力学的常数は得られないが, 試験器の形や試験速度を考慮すれば力学的常数も導かれる場合もある。これらの選択は実用目的に近似したものがよいということになる。

アツタベルク試験は経験的方法ではあるが, 土の転移点を決定するという意味をもつていと考えられる。

この報告をつくるにあたり山形大 東山勇氏の協力を戴いたことを感謝します。

引用文献

- 1) 山崎不二夫ほか6名：農土論集14, 1965
- 2) 妹尾 学：土壤粒子の分散と凝集(1),(2)
農業技術, 17, 221~225, 340~343, 1962
- 3) 須藤清次, 安富六郎：土壤のレオロジー,
土肥誌, 34, 296~306, 1963
- 4) 安富六郎：土壤のコンシステンシーの測定法
土壤の物理性, 11-12, 9~22, 1964
- 5) Reiner, M : Deformation, Strain, and Flow, Lewis, 1960
山田・柳沢訳 : レオロジーの基礎理論, コロナ, (1962)
- 6) 中川鶴太郎：レオロジー, 岩波, 1960
- 7) van Olphen, H: Clay Colloid Chemistry, John Wiley, 1963

土 壤 の 易 耕 性

九州農業試験場 木 下 彰

1. 易 耕 性 の 定 義

“易耕性”という語が日本ではじめて用いられたのは、野口彌吉・福田仁志訳：L. D. ベーバー、*土壤物理学*、昭和30年8月、朝倉書店（L. D. BAVER: *Soil Physics*, 1948）において、*soil tilth* の訳語としてである。

藤原彰夫らは¹⁾、訳書「ラッセル著、*土壤条件と植物生育*」で、*soil tilth* の訳語として“土肌”を採用しているが、以下に述べるように*soil tilth* の定義、内容を適切に表現する点において、易耕性のほうが好ましいように思われる。

以下、易耕性を*soil tilth* の同意語として論をすゝめる。

Russell²⁾によれば、易耕性はアイマイな概念であるが、これには二つの因子を含んでいるとしている。①耕耘の粗密（*coarseness and fineness*）：粒団の粒径別分布と関連、②耕耘の熟否（*mellowness and rawness*）：水分の多少に関連、の二つと考えた。

また、好ましい易耕性をうるためには、つぎの土壤の性質が重要であるとしている。

(a) 孔隙の連続性： 過剰水の急速な下層への移動、CO₂ガスの急速な大気への拡散。

(b) 孔隙の安定性

(c) 孔隙の質と量： 干バツに対して保水し、しかも植物に供給しやすい水をもつ孔隙を多くもつこと。

(d) 表層土の粒団性（*crumbly*）： 粒団の大きさが風にとばされない程度に大きく、発芽によいように小さく、湿つた時に粘着せず、農具を使つた時に連結しないこと。

Baver³⁾によれば、易耕性は植物生育に関する土壤の物理的條件である、と定義される。この定義のなかには、植物生育に対する好適な物理的環境としての土壤の質を決定するすべての土壤条件を含んでいる。この物理的條件の大部分は、土壤の構造関係によつて占められている。

適度な通気、十分な水分、降雨の速やかな浸入はよい易耕性の関数となるが、しかし易耕性は単に構造だけの関係でなく、コンシステンシーのある相を含んでいる。

構造からみたよい易耕性土壤は、コンシステンシーでも表わすことができる。たとえば、構造からみたよい土壤は、もろくて扱いやすいが、このようなfriabilityはコンシステンシー

の主要な部分である。

したがって、易耕性は土壌のコンシステンシーの一定範囲内に表われる構造的性質に基礎を置いて定義され、結局、真の易耕性はコンシステンシーの好適範囲内のある構造的条件に関連しているものであるとみるべきである；易耕性は、本来植物生育を基にして定義されるが、土壌の面からは“耕しやすい”ことが基になる。なお、易耕性は動的な土壌条件である。

Lyon and Buckman⁴⁾によつてもBaverと同じく、易耕性は植物生育に関係する土壌の物理的条件であると定義されている。関与する因子としては、構造、とくに粒団化量 (Granulation) が重要で、また土壌水分も大きな因子として働くとしている。

米田⁵⁾によれば、易耕性はつぎの二つの内容を含んでいるとみている。

- ① 作物生育の培地としての土壌の物理的環境おもに土壌構造に関連
- ② 耕耘の難易を規定する土壌の物理的性質おもにコンシステンシーに関連

この見地より、易耕性の判定は土 構造、コンシステンシーの両面より行なりがよいとして、つぎの項目の測定を採用している。

1. 土壌構造について

- 1) 土壌懸濁液の安定度、水中沈定容積
- 2) 分散度
- 3) 粒団化度、粒団安定度
- 4) 透水性

2. 土壌のコンシステンシーについて

- 1) 針入度
- 2) 圧砕度
- 3) 固結度、連結度、剛性率
- 4) 可塑性限界
- 5) 液性限界

喜田⁶⁾は易耕性についての見解をとくに示していないが、土壌構造に関する論説において付随的に述べているところによると、易耕性を土壌耕作に関連する性質として解釈し、その判定項目として、可塑性、粘着性、針入度、砕易性、せん断強度などをあげている。

したがって、易耕性を土壌の耕作に対する性質としてのみとり上げ、植生に対する土壌の物理的条件を含めていない。植生に関連するものとして土壌構造を重視し、このうち植生に深い関係のある性質としては、①構造の安定度、②構造の孔隙性をあげている。

アメリカ土壤学会⁷⁾で採択されたSoil tilthの解釈(定義)は、具体的に示されている。すなわち、易耕性は「耕耘作業に対する応答(Response)および根の貫入に対する機械的抵抗」に「関係する土壌の物理的条件である」としている。これによれば、いままで述べたRusse¹⁾、Baver, Lyonら、米田などの採用している「植物生育に関連する……」を「根の貫入に対する機械的抵抗」と具体的に示して、狭い意味としていることが異なっている。

以上のように、易耕性の定義として、一般的には「植物生育に関連する土壌の物理的条件である」とするのは妥当であると思われるが、学術語としてはさらに具体的に内容を明示することが望まれるが、現在のところ困難であるので、アイマイな概念として用いざるをえない。

一般的について、良い土壌・悪い土壌というばあい、養分の豊否・供給力の見地からは肥沃度(性)(Fertility)、物理的条件の見地からは易耕性(Soil tilth)が対比できる語として用いられるように思われる。

2. 易耕性の判定尺度

易耕性を植物生育に関連した土壌の物理的条件であるとしたばあい、そのなかには多くの内容を含んでいる。易耕性の判定尺度を歴史的にみると、表-1に示すとおりである。

表-1 易耕性の判定尺度

提案者	年代	判定尺度	内容
Doyarenko	1924	Crumb, Clodの粒径別分布	粒径1~5mmが植生に好適
Wehr	1924	Atterberg Consistency constant	
Kvasnikov	1928	Crumb, clodの粒径別分布	
Keen et al	1930	Clodの粒径別分布	風乾度の篩別
Krause	1931	Clodの粒径別分布	ベンゼン中で篩別
Sokolovsky	1933	粒団化量 孔隙量	2~3mm粒団が植生によい 毛管孔隙と非毛管孔隙とが $\frac{1}{2}$ ずつがよい。非毛管孔隙が 10%以下は不可。
Henin	1936	圧入力(Force of penetration)	

Yoder	1937	非毛管孔隙量 粒団化量に関連	棉の播種床、ビートの発育より 実証
Scott-Blair	1938	圧縮性 (Compress- ibility)	圧縮量は Looseness の程度 を示す。
Richards	1941	圧入力	Penetrometer により測定
Shaw-Haise . Farnsworth	1942	圧入力	Penetrometer により測定 圧入力は土壌水分による変動大
Baver	1948	粒団化量 孔隙量	粒団は乾式篩別、水中および ベンゼン中篩別 (後二者より易 耕性の安定度判定) 孔隙は孔径を考慮、PF 1.5~ 2.0 で非毛管孔隙を分ける。
米田	1960	土壌構造、コンシス テンシーの全般	
農林水産技術会議 . 8)	1960	耕耘の難易 土地の乾湿	
喜田	1965	可塑性、粘着性、碎易性、 針入度、せん断強度	

表-1. を通覧してわかるように、易耕性の判定尺度としては、コンシステンシーに関するものと構造に関するものとに分けられる。これを一覧表として表-2. に示した。

表 - 2. 易 耕 性 判 定 尺 度 の 一 覧

コンシステンシーに関するもの	構造に関するもの
アッターベルクの恒数 (1)	粒団の粒径別分布 (8)
圧入力 (3)	孔隙の質と量 (4)
圧縮性 (1)	
コンシステンシーの性質全般 (2)	

[注] カッコの数は採用者の数

判定尺度としては、単純化していかうとする傾向がうかがわれる。しかし、各研究者が提案している尺度が、易耕性を適確に示すには不十分であるように思われる。なぜならば、易耕性それ

自体、アイマイな表現であり、しかもその意味する内容において、土壤の物理性一般とほとんど同じであるから、その判定には、物理性の全般にわたる各々の性質を測定する必要があると思われる。とはいえ、各々の性質の相互には関連性があるので、一つの性質より総合判定の可能性は存在する。各々の性質の易耕性における役割、さらに性質相互の関連性が明らかにされたのちに、より単純化された判定尺度がきめられるべきと思われる。

本誌においても、土壤の物理性測定法の特集号を2回（才2号、才11・12合併号）おこなっており、測定法自体が研究段階にある現状である。

3. コンシステンシーからみた易耕性

山中⁹⁾がいうごとく、土壤の物理性の研究においては、土壤をmaterialとして扱うことと現地の動的な状態を生産と関連させて取り扱うことが、重要な使命であると考えられるが、易耕性のばあいにはとくにこのことが強調される。

コンシステンシーはmaterialとしての土壤の力学的な面に関連がつよく、土壤構造は作物生育との関係が大きいものとみることができる。

コンシステンシーと構造との関係は、須藤¹⁰⁾が指摘しているごとく、土壤学専攻者は土木工学に不得意であり、逆に土木工学専攻者は土壤学的手法に不なれであるために、関連づけた研究成績が少なう。

土壤のコンシステンシーは耕作関係に密接に関連するが、農作業の具体的な問題として、つぎの項目があげられよう。

- (1) 播種床の整備
- (2) 農機具の扱いやすさ
- (3) 中・大型機械導入の可否
- (4) 耕耘作業と土壤構造の生成・破壊

さて、コンシステンシーの意味（定義）についてふれてみると、E. C. Blingham は「コンシステンシーとは、形を永久に変化しようとするのに抵抗する性質で、流動と力との関係で定義できる」としている。¹⁰⁾ 安富¹¹⁾ は「コンシステンシーは、土壤の変形過程における力学的抵抗の大きさを示す概念である」としている。実際上では、コンシステンシーは、耕耘作業における土壤の抵抗の大きさとしてみることができるわけであるが、どのような性質を、どのような

条件で測定すればよいが、また易耕性との関連が十分明かにされていない。

なお、Baver¹³⁾はJ. C. Russellの所説を採用して、コンシステンシーをつぎのように定義している。すなわち、「種々の水分含量で、土壌に作用する凝集および付着に関係をもつ物理的な力を表わすものであつて、それには三つの事項が含まれている。①重力、圧力、衝撃圧縮、および牽引に対する作用、②他の物体・物質に付着しようとする傾向、③手ざわりによる感覚、などである。」

コンシステンシーは土壌水分含量によつて自動的に変動するが、これに基づいてAtterberg¹³⁾は4つの基本型を提示した。

- (1) Sticky consistency (粘着、付着を示す)
- (2) Plastic // (粘りがあり成型できる)
- (3) Soft // (もろさを示す)
- (4) Harsh // (剛性を示す)

また、アッターベルグは土壌水分含量による変化限界を示しているが、この限界は土壌を加工成型して測定しているので、作物生産における場としての土壌が自然状態の構造であることを考えれば、易耕性との関係を適確に表わすことはできないと思われる。

表-3にアッターベルグ限界と易耕性の尺度の性質との関係を対比することを試みた。

表-3 アッターベルグ限界と易耕性の尺度

アッターベルグ限界		水分	硬さ・状態	関連する易耕性の尺度	
				耕作関係	植生関係
液性限界		多	軟、液体的		支持力(水田)
索性領域	粘着限界	↑	中、弾性体的	圧入力(針入力) 粘着性 地耐力 碎易性 可塑性	根の伸長・發育 (水田、畑)
	索性限界				
凝集限界 (収縮)		少	硬、固体的	せん断抵抗	根の伸長

アッターベルグ限界(恒数)は外力に対する土壌の応答の基本的な性格を表わすのには有効であるが、易耕性の判定尺度としては不十分であると思われる。

易耕性の判定尺度のうちでコンシステンシーに含まれる性質の項目は、わが国の農地の土壌条件の特殊性、すなわち、水田(湿田、半湿田、乾田の落水・灌水の管理)、火山灰土などに適した独自のものとして設定する必要がある。

つぎに従来よりコンシステンシー判定に用いられた性質を列举して、易耕性判定に対しての有効さについて考察することにする。

(a) 碎 易 性

この性質は整地作業の巧拙に関係し播種床の整備のうえで重要と考えられる。この測定は山中¹⁴⁾のいう連結度によつて測定できる。

(b) 圧 入 力(硬度、針入力)

この性質は中、大型機械導入の可否の判定に必要である。山中¹⁴⁾の考察した土壌硬度針は簡便であるが、おもに土壌断面判定用であるので、土層内部まで連続的に測られない不利がある。コーンペネトロメータは土層全層用に用いられる。

土壌硬度と機械の導入可否について、各種の測定器を用いた結果では、測定器間の値が乱れ、相互に比較できないとしている¹⁵⁾。これを表-4に示す。

表-4 圧入抵抗 (K_g/cm^2) と作業の難易

作業の難易 測定器	不 能	困 難	可 能
農業機械化研製 小型円錐	< 5	5~7	> 7
全 上 大型円錐	< 4.5	4.5~6	> 6
山中式 硬 度 計	< 0.8 (< 7 mm)	0.8~1.6 (9~11 mm)	> 1.6 (> 11 mm)

[注]

(1) 小 型 円 錐 頂角 30° 長さ 30 mm 断面積 2 cm^2
 大 型 " " 30° " 51 mm " 6 cm^2
 山中式 硬 度 計 " 30° " 40 mm

(c) 粘 着 力

凝集力(Cohesion)、付着力(Adhesion)は農器具の作業能率、作業巧拙に関係するので、この測定は必要である。

土壌を粘性体とみなして、各種の粘度測定器が考案されているが、現地の土壌条件に適応した方法および測定成績はなお不十分のように思われる。たとえば、水田用と畑地用の測定器、自然構造土壌を対象とした測定方法、測定値と現地での機械作業との関係が明確でないので、これらの検討の必要が残されている。

(a) セン断強度

この強度は農具によるセン断の強さを知るうえで有効であろう。従来用いられている直接セン装置を実際の農具の機構に近づけることにより、より実際的な関連がえられるものと考えられ、土木工学的より農学的な装置、方法の開発が望まれる。

4. 構造からみた易耕性

さきに述べたように、構造が易耕性に関連するものとして、つぎの項目があげられる。

(1) 粒団の粒径別分布

粒団には、Aggregate, Crumb, Clod, Granule を含む。

(2) 孔隙の質と量

おもに非毛管孔隙の量が易耕性に関係するとするものが多い。

ここで粒団の分類についてふれると、アメリカ土壤学会で採択したものは、つぎのようである。
カッコ内は筆者の訳

Aggregate(粒団): Compound particle of soil
Crumb : Rounded porous aggregate up to 10mm in diameter
Clod(土塊): Lump of soil material
Granule : Friable rounded aggregate of irregular shape up to 10mm in diameter

わが国においては、このような粒団の分類はないが、粒団の粒径別分布と同時に、粒団の質が構造に及ぼす影響が大きい。

粒団化量と質、これと孔隙の量と質とは互に関連しているものであるが、易耕性への関与をみると、前者はコンシステンシーを通して土壌耕作に、後者は構造を通して植物生育に関係がふかいものと思われる。

美園¹⁴⁾は3相(固相・液相・気相)の組合せの状態を3相構造として提案し、構造上の重要な性質であるとしているが、これはいまのべた両者の総合した性質をみるうえで有効であると考

えられる。

また、構造の総合的なFabricをみるには、SchofieldのPF一表示法も有効な手段であると考えられる。

構造が植物生育に関する易耕性に関係する面は、

- (1) 土壤通気が十分に行なわれること
- (2) 有効水分を適当量ふくむこと。
- (3) 根の伸長に対して土壤の機械的抵抗が小さいこと、

の3つであろう。

これらの3つの項目を総合的に一つの測定項目で判定することはできないので、各々について測定する必要がある。現在、有効と考えられている方法について述べると、つぎのとおりである。

(a) 粒団の粒径別分布

水中篩別法による耐水性粒団の測定がよいと考えられる。耐水性粒団は構造の基本単位とみなされ、また実験の再現性がよい。

この分布によつて、土壤通気、有効水分量(毛管水)、根の伸長抵抗のおおよその推定が可能となる。

(b) PF-水分曲線

pF 0よりしおれ点までのpF-水分曲線は、孔隙の大きさと量を知ることができ、通気性、保水力の判定が可能である。この曲線によつて非毛管孔隙量も算出されるので、きわめて有効なもの目される。

pF測定法は寺沢¹⁵⁾がくわしく述べているので省略する。

(c) 非毛管孔隙量

この量は通気性の目安として用いられ、圃場容水量以下の低pFの孔隙で、そのpF値には定説がない。多くの研究者の値を示すと、

Baver	:	pF	1.5~2.0
椎名 ¹⁶⁾	:	pF	1.5~2.0
真下 ¹⁷⁾	:	pF	1.7
木下 ¹⁸⁾	:	pF	2.0~3.0(≒2.7)
松尾 ¹⁹⁾	:	pF	2.42
農林水産 ⁸⁾ 技術会議	:	pF	1.5
Richard ²⁰⁾	:	pF	1.7~2.0

Colman²⁰⁾ : pF 2.5

非毛管孔隙量は易耕性判定の重要な指標となるので、その測定はぜひ必要である。しかし、これはあくまで量的なもので、機械的な面を確実に把握するためには、その通気性測定が望ましい。孔隙の測定については箱石²¹⁾の記述がくわしい。

(d) 通気性

非毛管孔隙の孔径分布、孔隙の連絡性などの総合的な機能として表われるものであるから、この測定が望まれるが、自然構造の土壤に適した測定法が確立していないうらみがある。

土壤中の空気の運動は拡散に基づくことが多いので、空気組成を測定する方法がよいと考えられる。

(e) 有効水分量

この量は植物に生理的水分を供給する能力判定に有効である。その水分保持の張力範囲の下限は圃場含水量を当てるべきであろう。なお、有効水分の張力領域内の水分の有効度について、論争が行なわれたが²²⁾、有効水分均一効果説(Veihmeyer, Israelson, Wadsworth and Das, Boynton)は否定され、不均一効果説(Lundegardh, Lewis, Martin, Aldrich, Furr, Taylor, Davis)を正しいとする意見が多い。これらの論争の基く点は、水の伝達(毛管伝導速度)の相違によるものと考えられ、水の伝導度の重要性が認識される。

(f) 透水性

降雨の急速な下層への浸透は耕地の必要条件である。自然構造土壤について、上層の配列を考慮に入れて測定することが望まれる。

5. 農林省の諸事業に採用されている易耕性の尺度

農林省では土壤関係の事業を行なっているが、易耕性関係の判定項目をあげると、つぎのようである。なお、この判定項目は畑土壤の生産力に関する研究⁸⁾が基礎となつている。

(1) 耕耘の難易

つぎの3つの項目によつて総合的に判定する。

① 表土の土性

区分	土性	要因強度
粗	S, LS, SL, FSL	1
中	L, SiL, SCL, CL, SiCL, SC	2
細	LiC, SiC, HC	3

〔注〕 要因強度は1の方が阻害が少ない

② 表土の粘着性

湿潤時の土壌の農具に対する粘着の度合を感覚によつて判断する。

区 分	要 因 強 度
なし—弱	1
中	2
強	3

③ 表土の風乾土の硬さ

区 分	要 因 強 度
軟	(2)
やや硬	1
硬	2
非常に硬—極硬	3

(2) 土地の乾湿

透水性、保水性、湿潤度より判定する。

① 透水性

こゝでいう透水性とは、土壌の通気、通水能力を示す指標で、infiltration, percolation, permeability などの諸性質を内包するものである。適確な測定法は研究中有るので、さし当り山中式注入法、Musgraué 法を適宜使用し、全土層状態(土性、構造、孔隙など)を考慮して総合的に判定する。

② 保水性

こゝでいう保水性は有効水分保持能を示す意味で、表土および次層土壌の圃場容水量(pF 1.5)とシオレ係数(pF 4.2)の差から判定する。

区 分	区 分 強 度
大	1
中	2
小	3

区 分	pF 1.5—pF 4.2 ($\frac{\text{水cc}}{10000\text{cc土}}$)	要 因 強 度
大	20 以上	1
中	20~10	2
小	10 以下	3

③ 湿潤度

一時的な水分状態でなく、年間の支的水分状態を、土壤断面の水の影響をうけている程度から判定する。つぎの4区分に分ける(カッコ内の数字は要因強度)。(詳細は省略)

乾～半乾(2), 半湿(1), 湿(2), 多湿(3)

以上のように、易耕性の判定は統一した計器によらず、また感覚に依存することが多く、この面の研究の必要性を痛感する。

6. おわりに

易耕性について述べるにあたって、わが国における研究成績があまり多くないので、主観的に記述せざるをえなかつた。こんど、易耕性をはじめ、土壤の物理性の研究方向、統一的な測定方法の検討とその決定、また用語の統一、などについて、本研究会において検討することを熱望する。

引用文献

- 1) 藤原彰夫ほか訳: ラッセル, 土壤条件と植物生育
- 2) E. J. Russell . E. W. Russell: Soil Conditions & Plant Growth, 397 (1927)
- 3) L. D. Baver: Soil Physics, 380, (1956)
- 4) T. L. Lyon and H. O. Buckman: The Nature and Properties of Soils, 52, (1936)
- 5) 米田茂男: Soil Tilth の判定法について, 土壤の物理性, 才2号 24~28 (1960)
- 6) 喜田大三: 土壤構造の判定法, 土壤の物理性, 才2号, 28~33 (1960): 団粒分析法, *ibid*, 才11~12 合併号, 33~46 (1965)
- 7) Glossary of Terms Approved by the Soil Science Society of America, Soil Sci Soc. Amer. Proc, 26 316 (1962)

- 8) 農林省農林水産技術会議事務局： 畑土壤の生産力に関する研究， 31~44
(1962)
- 9) 山中金次郎： 土壤の物理性，才1号，1~2 (1959)
- 10) 須藤清次： 工学における土壌学，土壤の物理性，4~8 (1960)
- 11) 安富六郎： 土壤のコンシステンシーの測定方法，土壤の物理性 才11~12合併号
9~22 (1965)
- 12) 野口彌吉・福田仁志訳： L. D. ベーバー，土壤物理学，109~134 (1955)
朝倉書店
- 13) L. D. Baver: Soil Physics, 3rd ed. 97 (1960)
- 14) 山中金次郎： 土壤のコンシステンシーの測定法，土壤の物理性，才11~12合併号
1~8 (1965)
- 15) 農林水産技術会議事務局： 土壤肥料分野における農業構造改善のための技術指針
(未定稿) (1965)
- 16) 美園 繁： 土壤の履歴現象に関する研究，農技研報告，B11，1~197
(1961)
- 17) 寺沢四郎： 土壤水分の吸引力(PF)の測定法，土壤の物理性，69~82
(1965)
- 18) 椎名乾治： 畑地の水分管理に必要な2・3の水分恒数とその測定法，土壤の物理性，
才11~12合併号，83~90 (1965)
- 19) 真下育久： 林木の成長と土壤の物理性，土壤の物理性，才8号，27~35
(1963)
- 20) 木下 彰： 未発表
- 21) 松尾憲一： 粒径組成と土壤の物理性に関する研究，農技研報告，B14
275~356 (1964)
- 22) L. A. Richards and C. H. Wadleigh: Soil water and Plant
Growth, 73~251 (1952) B. T. Shaw: Soil Physical
Conditions and Plant Growth (1952)
- 23) 箱石 正： 土壤孔隙の測定法について，土壤の物理性，才11~12合併号
47~56 (1965)
- 24) 玉井虎太郎： 土壤有効水の性格と畑地かんがい，畑地かんがい，No.15，6~11
(昭和34年3月)

耕起法の違いが畑土壌の理化学性に及ぼす影響 表面攪土耕および反転耕の比較

農事試験場畑作部 石井和夫

従来多くの労力を要した耕起作業は、人力、畜力から機械力の利用へと発展するに伴って比較的その作業が容易となり、また土壌条件、作付様式などの諸条件に応じた種々の方法²⁸⁾が可能となつた。

しかしながら、このような機械化による耕起型式の変化は畑土壌の理化学的性質に影響を及ぼし、種々の問題が提起されている。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾ 筆者は、畑地力の維持の立場から見た合理的な耕起作業方法を確認するため、大型機械の導入に伴うこれらの諸問題を検討中であるが、本稿では一般に広く行われている反転耕と、非常に簡易な耕起法⁶⁾として実施されている表面攪土耕¹⁶⁾とを対比しながら、大型機械化一貫作業条件下において、両耕起法の違いが土壌の理化学性に及ぼす影響について報告する。

なお、圃場試験は畑作部作付才2研究室および業務科との共同研究として実施中のもので、作物の生育収量並びに機械化作業はこれら共同研究者によつて行われた。

1. 試験方法

1) 供試圃場 本供試圃場は畑作部内の平地林の一部を昭和37年春開墾した圃場で(土壌は火山灰土壌であるが、約50年以前は耕地であつて当時若くは沖積土壌の客土が行われた模様)当初青刈大豆の均一栽培を行つた後同年冬作より試験を開始した。試験開始に際しては、夏冬作の2回に亘つて10a当り消石灰280Kg、苦土石灰320Kg、過石400Kg、硫酸加里30Kgを地表より深さ15cm間の土壌に均一に混施し土壌改良を行つた。

2) 処理区(耕起法)

i) 表面攪土耕: 前作物を収穫後、デスクハロによつて縦横2回掛を行う。これは圃場表面を約5~8cmの深さに薄く攪土する極めて簡易な耕起法(簡易耕とも云う)である。

ii) 反転耕: 14"のボトムプラウで深さ約15cm耕起を行う。

なお、試験開始後2作目までは両耕起区とも反転耕を行い、3作目よりこの区を2分して表面攪土耕区(以後表攪耕区と略記する)を設置した。

現在まで6作(3年)を経過し(表攪耕区は表攪耕開始4作経過)現在試験を継続中である。

3) 試験の規模 1区25aとし1反復で行う、また圃場作業はすべて大型機械(フアーガソン、インター、コンバイン(クレイス))による。

4) 供試作物および施肥量 各作物ともそれぞれ均一栽培とする。供試作物の作付順位ならびに施肥量は次の通りである。

作付順位	供試作物	施 N	肥 P ₂ O ₅	量 K ₂ O
1 作目	小 麦	8.5	8.0	8.0Kg
2 作目	青 刈 コ ー ン	10.4	10.4	10.4
3 作目	小 麦	7.2	10.8	7.2
4 作目	大 豆	2.4	8.0	8.0
5 作目	大 麦	6.4	10.7	6.4
6 作目	実取 コ ー ン	9.1	5.1	8.2

II 試験結果および考察

1) 耕起法の違いが土壌の化学性に及ぼす影響

表攪耕と反転耕との差異には、耕起深度ならびに土壌の機械的処理法(攪拌と反転)の2つの要因が考えられる。ここでは耕起深度の違いによる耕土およびその直下の土の化学性の変化を比較するため、試験開始後6作目を経過した両区より、上層(0~7.5cm, 表攪耕区の耕土、および反転耕区の耕土内上部に相当)、中層(7.5~15.0cm, 表攪耕区の耕土直下および反転耕区の耕土内下部に相当)、下層(15.0~22.5cm, 反転耕区の耕土直下に相当)の三層に分けて土壌を採取し、化学分析を行った。本稿では三要素の養分含量についてのみ検討を行う。

1) 窒素の供給力: 各層位別の窒素の供給力を乾土効果によつて比較すると表1に示す通りである。表攪耕区の乾土効果は上層が最も高く、中・下層はやゝ劣つた。また反転耕区では、上・中層間差異は少く下層のみが劣つた。また両耕起区の乾土効果を比較すると表攪耕区の耕土(上層)は明かに反転耕区の耕土(上・中層)より勝つた。

表1 耕起法の違いが土壌の三要素養分含量に及ぼす影響

mg/乾土100g

耕起 処理	層 位	乾 土 効 果			Al-H ₂ O	Trueg-NO ₃	P ₂ O ₅ 積算投入量	※ 置換性 K ₂ O
		NO ₃ -N	NH ₄ -N	計				
表 攪 耕	上 0~7.5	6.74mg	1.09mg	843	96.1mg	6.7mg	146.2 mg	19.0
	中 7.5~15.0	5.02	0.62	564	50.7	2.2	77.2	7.0
	下 15.0~22.5	4.39	0.65	504	41.4	0.8	0	3.9
反 転 耕	上 0~7.5	5.42	1.20	662	79.8	4.2	117.2	17.0
	中 7.5~15.0	5.61	2.01	762	79.7	4.3	113.7	12.0
	下 15.0~22.5	5.03	0.72	575	42.7	1.3	0	7.4
原土	上 0~10	0.71	11.10	1181	46.6	0.7	—	4.2

(3年6作経過)

※ 試験開始以降投入した磷酸肥料(改良資材として加えた磷酸も含む)の成分総量を乾土 100g 当りに換算した。

圃場で栽培した作物は収穫物として大部分が取去られるが、しかし根系・刈株・落葉などは作物残渣として畑に還元される¹⁵⁾。この残存物の多少が栽培跡地土壤の腐植含量に影響を及ぼすとともに、それらに含有されている養分の量と濃度はまた跡地土壤の養分含量に関係してくる。¹⁰⁾

²⁹⁾¹¹⁾ 本試験においても、耕起法の違いによつて残存する作物根量の差異が推測され、またコンバインによる収穫の場合は刈株等の収穫物残渣が必然的に増加し、耕起法の差異によつてこれら残渣の土壤中の分布(鋤込位置)が異なることが考えられる。

そこで耕起後の前作物残渣の土壤中における分布ならびにその量を明らかにするため、夏作コーンおよび冬作大麦跡を耕起後、土壤を層位別に採取して水中篩別の方法⁹⁾に準じて根系および刈株の分布状況を調査した。表 2 は大麦跡の耕起後の調査結果を示したものである。これからわかるように、0~2.25 cm 間の土壤中の残根刈株の全量は両区とも殆んど差異がないが、層位別の分布には明らかな差が見られる。すなわち表攪耕区では全残渣量の 7.4% が上層に分布し、しかも刈株はその全量が上層に見られ中・下層には全く分布していない。これに対して反転耕区では、上・中層(同区の耕土内に相当)にほぼ均一に分布し下層の分布は明らかに少なかった。

このような作物残渣の分布状況の差異は、両耕起区の作物根系が異なること、——後述するよう表攪耕区の中層以下の土壤は 4 作の栽培期間全く機械による攪乱が行われず、その期間表面からのトラクタの車輪踏圧が数多く繰返されたために土壤硬度が著しく高まり、根系が浅くなった——また耕起深度の違いによつて刈株の鋤込位置が異なることなどにもとづく。

また表 2 で特筆すべきことは、刈株の量が手刈の場合よりも極めて多い点で、これはコンバイン収穫に際する高刈(1.5~2.0 cm)の影響と考えられる。刈株の量は収穫時における条件で種々異なるが、本試験の大麦では全麦稈重の 30% に相当した。

機械化栽培条件下では、以上の通り収穫物残渣が多量に還元され、かつ耕起法によつて耕起後のこれらの分布状況が異なるが、これらの結果を前に述べた層位別の窒素供給力と比較するとその傾向は非常に良く一致する。また、土壤中の微生物活性や菌量をほぼ同様の方法で層位別に調査した結果を見ても、¹²⁾ 有機物(主として作物残渣に由来すると考えられる)の供給ならびに分解が両耕起区の層位によつて異なることが確認された。これらのことから、毎作における作物残渣の層位別還元量の違いが、層位別の窒素の供給力の相異の原因となつたと考える。また残渣の質の違い(C/N 比等)も当然窒素の供給力に影響を及ぼすと考えられるから⁸⁾³⁰⁾ 前作物の種類によつて耕起後の層位別窒素の供給力が異なることが推定されるが、これについての検討は行っていない。

表 2 耕起の作物残渣(残根・刈株)の分布状況 大麦跡耕起後調査

(Kg/10a)

区	項目 深さ	残 根		刈 株		残 渣(合計)		
		風乾重	// 指数	風乾重	// 指数	風乾重	// 指数	含有率
表 攪 耕	上 0~75 ^{cm}	333.3	68.3%	107.5	100.0%	440.8	74.0%	0.687%
	中 75~150	72.5	14.8	0	0	72.5	12.2	0.136
	下 150~225	82.5	16.9	0	0	82.5	13.8	0.136
	0~225	488.3	100.0	107.5	100.0	595.8	100.0	0.334
反 転 耕	上 0~75	204.2	41.3	58.3	56.9	262.5	44.0	0.456
	中 75~150	192.5	37.5	37.5	36.6	230.0	38.5	0.386
	下 150~225	97.5	6.7	6.7	6.5	104.2	17.5	0.187
	0~225	494.2	100.0	102.5	100.0	596.7	100.0	0.345

注) i 調査は $40\text{ cm} \times 40\text{ cm} = 160\text{ cm}^2$ の面積につき 1mm 節を使い、水中節別により根および刈株を分離した。3 反復平均値

ii 指数は 0~22.5cm 間の全風乾重を 100 とした層位別の分布割合を示す。

iii 含有率は乾土 100g 当り残渣の含量(%)を示す。

ii) 有効リン酸：前項と同様の試料について有効リン酸(Truog P_2O_5)、アルミ型リン酸の分析を行いこの結果を表 1 に示した。これを見ると、表攪耕区上層の有効リン酸の含量が著るしく高く、中・下層では低い。また、反転耕区では上・中層ともほぼ等量であるがその含量は表攪耕区の上層より劣る。これらの結果は前述した乾土効果の場合と全く同様の傾向である

山本ら¹³⁾ は火山灰土壌においては乾土 100g 当り 7.5mg 以上のアルミ型リン酸が存在すれば、その土壌のリン酸の肥沃度は高く維持されることを認めているが、この値を表 1 に示した両耕起区の上層のアルミ型リン酸の含量と比較すると、表攪耕区の上層はこれより明らかに高く反転耕区の耕土(上・中層)は限界値に近似的、また両耕起とも耕土直下では明らかに低かった。

次に、このように有効リン酸およびアルミ型リン酸の含量が異つた原因を検討するために、試験開始以来 6 作目までに施用されたリン酸(積算投入量)を耕起法および仮比重をもとにして計算によつて求めて見た。この結果は表 1 に示す通りである。表攪耕区では上層以外は全く土壌の攪乱が行われなかつたので、当然の結果ではあるが中・下層に対するリン酸の投入量は少く、上層のみに非常に多くなる。反転耕区では耕土内の上・中層はほぼ等量であるが全積算投入量が同じであるから、その値は表攪耕区の上層より明らかに少い。

火山灰土壌における作物による肥料リン酸の利用率は極めて少く¹⁷⁾、大部分が土壌リン酸として蓄積され、またその主なる型態がアルミ型¹⁴⁾、ついで鉄型リン酸である。また、一般にこのような蓄

積磷酸含量と有効磷酸含量との間には正の相関が認められている。これらのことから、前述した両耕起区の層位別有効磷酸含量の差異は、耕起法の差異によつて層位別の磷酸積算投入量が異つた結果によると考えられる。

iii) 置換性加里：置換性加里の分析結果は表1に示す通りで、加里においても今まで述べた窒素、磷酸の分析結果と全く同様の傾向が認められた。これらの原因については明らかでないが、表3に示した作物残渣の分析結果¹⁶⁾から推定して、窒素の場合と同様に層位別作物残渣の還元量の違いが原因と考える。

表3 作物残渣の量と残渣中の三要素含量 (Kg/10a)

作物	残渣の量	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
小麦※	残根 80~130	}1.8	0.4	3.1
	刈株 150~250			
荳科※	残根 60~70	}3.8~6.0	1.2	4.0
	地上部 90~120			
小麦△	刈株 180	4.0	0.7	2.0
青刈コーン△	〃 135	1.0	0.3	2.1
大麦△	残根 488	}4.9	1.2	3.0
	刈株 108			

※ 新耕作体系—マリツエフ農法(菅野一郎氏訳 農業技術14:211-215)より引用
△ 圃場試験(表攪耕)の結果

2) 耕起法の違いが土壤の物理性に及ぼす影響

土壤の化学性の検討に引き続き、表攪耕および反転耕に伴う土壤の物理性の変化を明らかにするため、両耕起区の土壤三相、硬度、孔隙、透水性などの調査を行いこれを比較した。

1) 仮比重、透水性、PF 水分含量：試験開始後6作(3年)を経過した両耕起区の土壤の物理性は表4、1・2図に示す通りである。

まず表4により両耕起区の仮比重を比較すると、表攪耕区では深さ5cmより著るしく仮比重が高まり深さ15cmから再び低下する傾向があるが、特に5~10cm間の仮比重が最も高かつた。反転耕区では15~20cm間の値が最も高く、両耕起区とも耕土直下における仮比重の増大が明らかに認められた。

また透水性においても仮比重と同様の傾向が認められたが、一般に火山灰土壤における飽和透水係数が10cm/sec²以上の高い透水係数を示す³¹⁾ことから、耕土直下における土壤の透水性は著るしく低下しているといふことができる。

次に同表によつて pF 水分含量(乾土%)を考察すると、両耕起区とも pF 4.0 の水分含量は耕土と耕土直下の土壤により明らかな差異が見られ、耕土の方が低い傾向を示した。火山灰土壤¹⁸⁾は風乾処理などによつて親水性が失はれ非自由水分¹⁸⁾(pF 4.2における水分含量)が減少する²⁰⁾といわれているが、本試験のように耕起深度が異なりながら両耕起区とも耕土とその直下の土壤において pF 4.0 の水分含量に違いが見られた。このような差異は耕起に伴う自然的な物理作用によつて耕土の非自由水分が減少したこと起因すると考えられる。また両耕起区とも耕土直下の pF 0 における水分含量が減少し、pF 1.5 では増加が認められ、したがつて耕土直下における土壤の粗孔隙の減少がうかがわれる。(孔隙については後述)

表 4 表攪耕区および反転耕区の物理性の比較

耕起法	調査地点 cm	※ 仮比重	透水性 Kcm/sec	pF-水分(乾土%)				
				pF 0	1.5	2.0	3.0	4.0
表攪耕	0~5	0.87	2.7×10	67.6	47.3	41.2	28.9	20.6
	5~10	0.96	2.1×10	62.6	57.4	49.7	35.1	26.0
	10~15	0.94	6.7×10	64.8	54.3	46.6	32.9	25.3
	15~20	0.86	1.8×10	67.7	46.7	—	—	28.0
反転耕	0~5	0.88	3.2×10	66.3	48.3	44.2	31.6	22.1
	5~10	0.88	2.4×10	66.0	51.3	44.6	30.5	21.6
	10~15	0.80	3.7×10	69.7	44.0	38.9	27.2	19.7
	15~20	0.94	1.7×10	63.3	57.1	—	—	27.5

※ 40年4月7日測定

ii) 土壤水分の消長ならびに孔隙の変化: 図1は両耕起区の水分率(v_L)の変化を固相率(v_S)との相関で示したものである。この結果は美園氏が行つたライシメータにおける実験結果²⁷⁾と同様で、 v_S と v_L の間には耕起法の如何にかゝらず正の相関が認められた。 v_L 、 v_S は0~15cm間の土壤についての測定結果を示したものであつて、前述した通りこの範囲の仮比重は明らかに表攪耕区が高いから、したがつて水分率は表攪耕区が高い傾向を示した。

次に v_S の変動によつて圃場における v_L に差異が見られた原因を明らかにするために、両耕起区より実容積法によつて土壤を採取し、pF水分率が固相率の変動によつてどう変るかを比較した。土壤を採取した深さは前回と同様深さ15cm以内である。

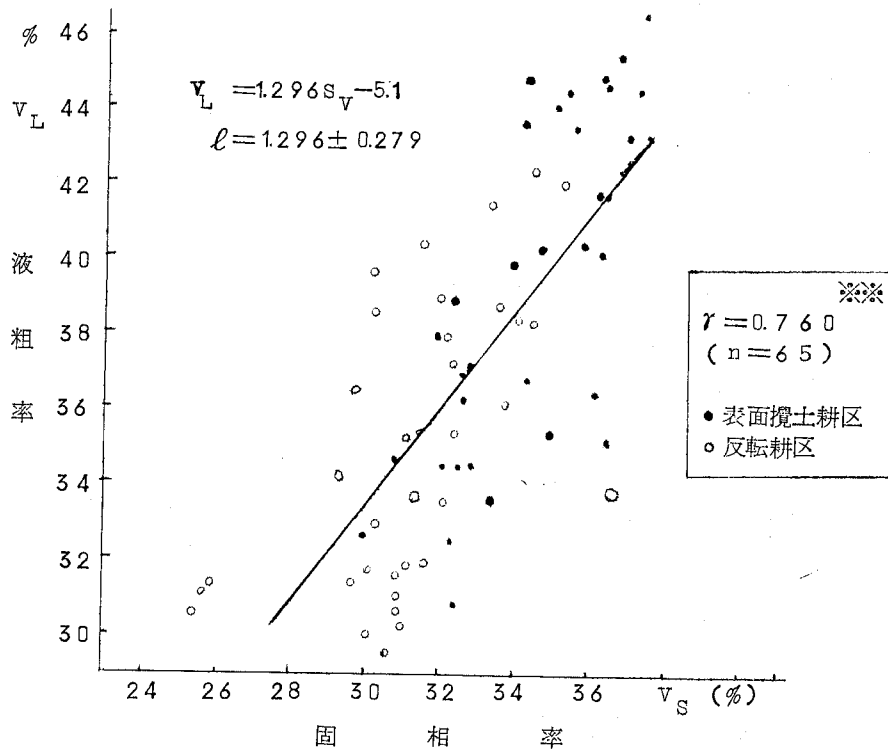


図1 表面攪土耕, 反転耕区の0~1.5cm間における V_S と V_L との相関

その結果図2に示す通り本実験の固相率の範囲においては, 同一pF条件下における V_L と V_S との間には正の相関が見られ, かつ直線の回帰係数は高pFほど低い傾向があつた。しかし統計処理の結果により, 回帰係数はpF 1.5ならびにpF 2.0とpF 4.0の間には有意差が認められたが, pF 1.5とpF 2.0の間には有意差が認められなかつた。この結果より V_S の増加に伴うpF 1.5ならびにpF 2.0における V_L の増加割合はpF 4.0の場合より明らかに高いといふことができる。また図2のpF 0と各pF条件下の V_L との差はそれぞれのpF条件下における空気率(V_A)を示すから, したがつて V_S の変化に伴うそれぞれのpFに相当する孔隙の変化を知ることが可能である。すなわち V_S の増加によつて減少する孔隙はpF 1.5~2.0以下に相当する粗孔隙であつて, その減少割合は全孔隙より高いから, pF 1.5~2.0以上の毛管孔隙がかえつて増大することがわかる。

pF 2.0~pF 4.0の範囲の V_L を保水力の指標として(火山灰土壌の圃場含水量はほぼpF 2.0に相当する²²⁾²³⁾) V_S と V_L (pF 2.0~pF 4.0間の水分率)との相関を求めると次の関係が得られた。

$$V_L (\text{pF } 2.0 - \text{pF } 4.0) = 1.224 V_S - 1.53 \quad r = 0.948$$

以上の結果比較的孔隙率の高い火山灰土壌では、固相率の増加（土壌の圧縮）によつて pF 2.0 ~ 1.5 以下の粗孔隙が減少し毛管孔隙が増加する結果保水力が増加することが明らかとなつた。表攪耕区の水分率が高かつたことも以上の理由によると考えられる。

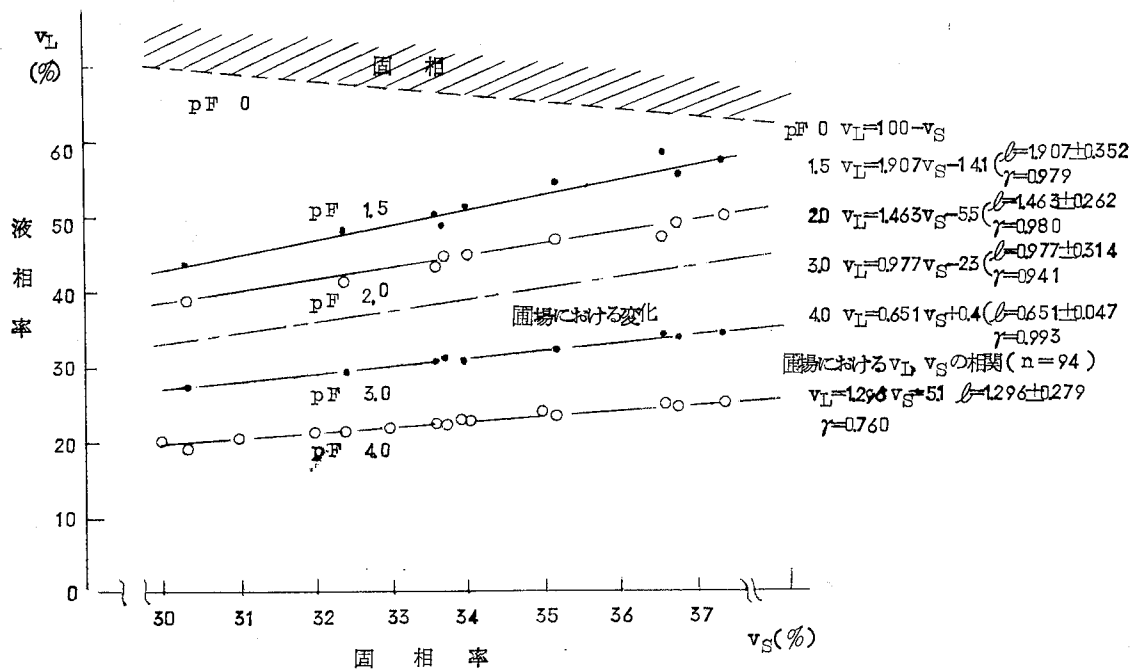


図 2 同一 pF 条件下における固相率と液相率との関係

注 i) 圃場における v_s , v_L の相関は両耕起の 0 ~ 20 cm 間の測定結果 9 4 点より求めた。

ii) pF 1.5, 2.0 は吸引法により、また pF 3.0, 4.0 は遠心分離法によつて求めた。

iii) 土壌硬度の比較：土壌硬度の物理的意味についてはなお明確を欠くことが多いが、一般に soil tilth 判定の基準のための実用的な比較値を得る目的で²¹⁾多くの測定が行われている。

そこで本試験では大型機械化一貫栽培条件下において、耕起法の違いが土壌硬度にどのような影響を及ぼすか、また圃場における土壌硬度のバラツキはどの程度か、など主として圃場におけるこれらの実態を明らかにしようとした。

まず表 5 により両耕起区の土壌硬度を比較すると、表攪耕区は深さ 7.5 cm の位置より下方に約 10 cm の厚さで土壌硬度が高まり、また反転耕区では約 17.5 cm の深さの位置を中心にして約 5 cm の厚さの土壌硬度が高く、両耕起区とも耕土直下で土壌硬度の増加が著しい。

これらの結果は前述した仮比重と同様の傾向である。

表 5 土 壤 硬 度 測 定 結 果

耕起処理	測定位置 (深さcm)	硬 度 [※]	標準偏差	変動係数	標準誤差	誤差の信頼限度	水分% M ₀
		Kg/cm ²	S	C _v	S _{\bar{x}}	$\bar{x} \pm t_{0.05} S_{\bar{x}}$	
表 攪 耕	2.5	8.0	2.34	29.2	0.68	8.0 ± 1.49	35.8
	7.5	19.0	4.47	23.5	1.29	19.0 ± 2.84	〃
	22.5	20.9	2.31	11.1	0.67	20.9 ± 1.47	34.7
	17.5	20.6	1.98	9.6	0.57	20.6 ± 1.26	〃
	22.5	17.8	2.30	12.9	0.66	17.8 ± 1.46	41.2
	27.5	13.9	1.88	13.5	0.54	13.9 ± 1.20	〃
反 転 耕	2.5	6.9	4.00	57.6	0.15	6.9 ± 3.68	38.1
	7.5	11.0	4.24	38.6	1.60	11.0 ± 3.92	〃
	12.5	14.9	2.85	19.1	1.08	14.9 ± 2.04	41.2
	17.5	20.4	2.64	12.9	1.00	20.4 ± 2.04	〃
	22.5	16.1	2.19	13.6	0.83	16.1 ± 2.03	43.0
	27.5	13.0	1.92	14.9	0.72	13.0 ± 1.77	〃
人 力 耕	2.5	3.9	2.03	52.1	0.72	3.9 ± 1.66	28.2
	7.5	5.6	2.90	51.8	1.03	5.6 ± 2.36	〃
	12.5	5.8	0.89	15.3	0.32	5.8 ± 0.73	30.4
	17.5	10.4	4.07	39.1	1.44	10.4 ± 3.32	〃
	22.5	11.9	2.80	23.5	0.99	11.9 ± 2.28	33.7
	27.5	10.4	2.33	22.4	0.82	10.4 ± 1.90	〃

※ SR-2型土壤抵抗計による測定結果一点につき12反復の測定を行った
昭和40年6月大麦牧穫前に測定

次に土壤硬度の圃場におけるバラツキをC_vによつて比較してみると、一般に各層位ともC_vの値は高かつたが、特にこの傾向は耕土において明らかである。この原因はいうまでもなく耕土内の土壤硬度が比較的低いため測定位置におけるトラクタの車輪踏圧の如何、およびトラクタの走行回数の影響を強く受けるためと考えられる。

また表6によつて両耕起区の年次別土壤硬度の推移を見ると、耕土内の土壤硬度は耕起前後によつて増加と低下を繰返してその変化が大きい。これに対し耕土層直下では比較的变化が少く、反転耕区では試験開始2作目、また表攪耕区では表攪耕開始前の土壤硬度はその後大きな変化を示さなかつた。

以上の通り両耕起区とも耕土直下から5~10cmの厚さで土壤硬度が増大し、したがって表攪耕区では反転耕区より浅い位置に土壤硬度の高い層が形成された。しかし年次別土壤硬度の推移から見て、その層における土壤硬度の増大は比較的短期間内に進行しその後の変化は比較的少いと考えてよい。

表6 土壤硬度(山中式硬度計)の経年的変化

耕起区	測定位置 (cm)	試験開始前 36.10	冬作	夏作	冬作	夏作	冬作	夏作
			1作 耕起直後 36.12.8	2作 跡地 37.10.17	3作※ 耕起直後 37.12.11	4作 跡地 38.9.9	5作 耕起直後 38.12.23	6作 跡地 39.10.5
表面攪土耕	2.5	14.0	13.0	16.5	10.0	13.5	12.0	14.0
	7.5	16.5	18.5	25.5	24.0	24.5	24.0	25.0
	12.5	17.5	19.5	26.0	24.0	24.0	24.0	24.0
	17.5	19.5	21.5	25.0	24.0	24.0	24.0	24.0
	22.5	23.0	24.0	24.5	24.0	25.0	24.0	23.0
	27.5	24.0	24.0	24.0	23.0	25.0	24.0	21.0
反転耕	2.5	14.0	13.0	16.5	7.0	12.5	13.0	11.0
	7.5	16.5	18.5	25.5	18.0	20.0	19.0	20.0
	12.5	17.5	19.5	26.0	19.5	21.5	20.0	21.0
	17.5	19.5	21.5	25.0	23.5	23.0	22.5	23.0
	22.5	23.0	24.0	24.5	24.0	24.0	22.0	25.0
	27.5	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	20.0	21.0

※ 表面攪土耕開始1年目

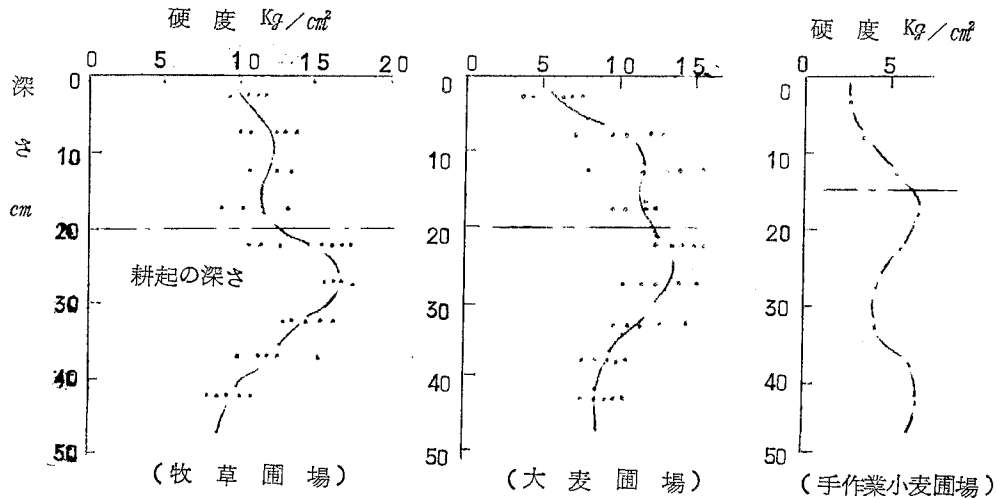
Ⅲ) トラクタの走行回数と土壤硬度の変化並びに踏圧層の形成: 前述で述べた圃場における土壤硬度の増大は主としてトラクタの車輪踏圧に起因すると考えるならば、圃場におけるトラクタの走行回数によつて土壤硬度が異なることが当然考えられる。また走行回数の増加に伴つて下層における土壤硬度がどのように変わるかについても更に検討する必要がある。

そこでこれらの関係を明らかにするために、まず大型機械化一貫作業を実施している圃場から比較的トラクタの走行回数の多い牧草圃場と、走行回数の少ない大麦圃場を選び、土壤硬度の実態を調査するとともに、~~標地~~圃場においてトラクタの車輪による踏圧試験を行い、走行回数と土壤硬度ならびに容積重との関係について検討した。

図るによつて牧草圃場と大麦圃場の土壤硬度を深さ別に比較すると、両圃場とも耕土層直下の土

壤硬度が最も高く前述した反転耕の場合と同様の傾向が認められた。しかし耕土内の土壤硬度は追肥・刈取りなどによるトラクタの走行回数が多い牧草圃場で明らかに高い傾向が見られた。

図3 機械化栽培圃場における土壤硬度の比較



- 注 1. コーンペネトロメーターによる貫入抵抗値 Kg/cm^2
 2. 大型機械導入後2年半を経過し、農作業は全て大型機械によつた
 3. 牧草畑のトラクタの走行回数25回、大麦は8回である。
 4. 耕起は14"ボトム・プラウによつた

いうまでもなく、図3に示した両圃場の走行回数は作業工程から求めたものであるからこの数値が土壤硬度の調査地点における走行回数とは考えられない。しかしながらこの実態調査から、機械化栽培によつて耕土直下の土壤硬度が増加すること(一般に耕盤¹⁾または犁底盤³⁶⁾といわれる層に相当すると考えられる)、また走行回数が多い場合には耕土内にも土壤硬度の高い層ができることなどがわかつた。

次に走行回数と土壤硬度ならびに容積重の変化との関係を知るために行つた踏圧試験の結果を述べる。なお試験処理区として、踏圧回数0, 1, 3, 5, 10回の5処理区を設け、その他の条件を一定にするため土壤水分(39.5~40%)接地圧(インター約1.2t接地圧は測定していない)などは同一とした。

これらの試験結果は図4・5・6, 表7に示す通りである。まず図4によつて走行回数と土壤硬度の深さ別の変化を見ると、各走行回数ともタイヤ接地面に近いほど硬度が高く、かつ土壤硬度が増大する範囲(深さ)は走行回数10回の場合においてもタイヤ接地面より深さ10cm以内

に限られそれ以下の土層では大きな変化が見られなかつた。なおタイヤ接地面から水平方向に

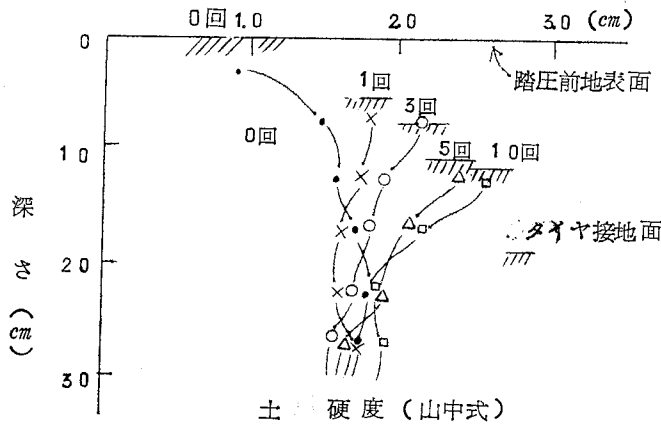


図4 表層踏圧による土 硬度の変化
回：走行回数を示す

する土 硬度の変化も測定したがこれらの変化はほとんど見られず、またタイヤ接地面ではタイヤ巾の中心線より鉛直方向の土 硬度が各深さとも高い傾向を示した。¹²⁾ (図省略)

次にトラクタの走行回数 (N) を変えた場合の容積重 (乾土重 / 1000g) の変化を容積重比 (e) で示し両者の関係を示す

と図5となる。(e は走行前の各深さまでの容積重の平均値を1とした場合の比率)。図5の (b) は深さ別に見た e の変化を示したもので、走行回数の増加によつて容積比重が増加する土 壤の範囲は深さ 0 ~ 1.5 cm (タイヤ接地面より 0 ~ 1.0 cm) であつて特に 0 ~ 1.0 cm 間の数値が高い。この傾向は図4の土 硬度と同様である。また図5 (a) は地表面から各深さまでの e の変化を示したものであるが、走行回数 (N) と e との関係は次の実験式で示される。³³⁾

$$e = 1 + \frac{N}{a + bN} \quad (a, b \text{ は常数})$$

この実験式の常数の値は図5に示す通りである。これらの実験式より求めた走行回数 (N) に対する容積重比 (e) の計算値は表7に示す通り実測値と極めて良く一致する。

また表7の $N \rightarrow \infty$ の場合の e_{∞} の数値 $(1 + \frac{1}{b})$ と各走行回数における e_N との比率³³⁾ を 0 ~ 1.0 cm 間における実測値について求めてみると、 e_1 / e_{∞} (N=1回の時の e_1 と $N \rightarrow \infty$ の時の e_{∞} との比率を示す) は 93.3%、同様に $e_3 / e_{\infty} = 96.9%$ 、 $e_5 / e_{\infty} = 98.3%$ が得られ、本実験条件下では5回の走行によつて $N \rightarrow \infty$ の場合の e の極限值にほぼ近以した。

佐々木氏³³⁾はローラの通過回数と地表面の沈下量との実験公式を求め、これより各通過回数に対する締固め度を求めている。これによると N=3回の場合は $N \rightarrow \infty$ の場合の 55 ~ 75%、N=6回の場合は 70 ~ 85% を示し、容積重から求めた本実験の式の場合とかなりの開きがあるが、このような差異が本実験に用いた踏圧時の条件の何に起因するかについては検討していない。

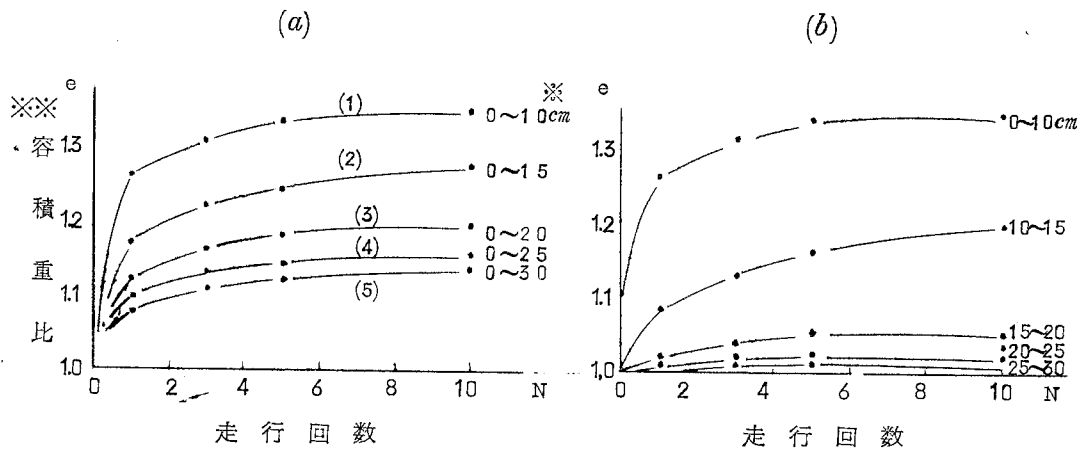


図5 トラクタの走行回数と土壌容積重比との関係

※※ 踏圧前の容積重を1とした場合の比を示す

※ 踏圧前の地表面よりの深さを示す

Nとeの関係式

(1) 0~10cm	$e = 1 + \frac{N}{1.019 + 2.869N}$	$N \rightarrow \infty \quad e = 1.349$
(2) 0~15cm	$e = 1 + \frac{N}{2.303 + 3.545N}$	$N \rightarrow \infty \quad e = 1.282$
(3) 0~20cm	$e = 1 + \frac{N}{3.522 + 5.004N}$	$N \rightarrow \infty \quad e = 1.200$
(4) 0~25cm	$e = 1 + \frac{N}{3.812 + 6.444N}$	$N \rightarrow \infty \quad e = 1.155$
(5) 0~30cm	$e = 1 + \frac{N}{4.921 + 7.373N}$	$N \rightarrow \infty \quad e = 1.136$

表7 eとNとの関係(計算値と実測値の比較)

N	e _N 0~10cm間			e _N 0~15cm間			e _N 0~20cm間		
	計算値	実測値	差	計算値	実測値	差	計算値	実測値	差
0	1.000	1.000	—	1.000	1.000	—	1.000	1.000	—
1	1.257	1.258	-0.001	1.171	1.169	+0.002	1.117	1.118	-0.001
3	1.312	1.307	+0.005	1.232	1.216	+0.016	1.162	1.156	+0.006
5	1.325	1.326	-0.001	1.250	1.242	-0.005	1.175	1.178	-0.003
10	1.337	1.340	-0.003	1.265	1.267	-0.002	1.187	1.190	-0.003
∞	1.349	—	—	1.282	—	—	1.200	—	—

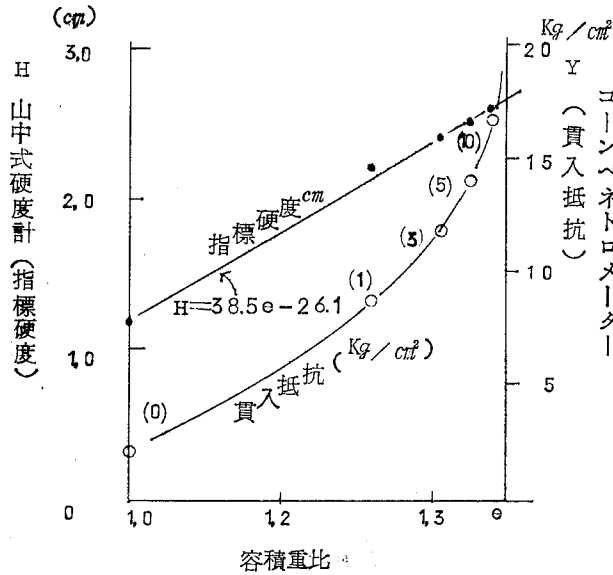


図 6 土壤硬度と容積重増加率との関係

- 注 I) ()内数字は走行回数を示す
 注 II) $e=1$ は容積重 $67.2 \text{ g} / 100 \text{ cc}$
 注 III) 土壤水分: $39.5 \sim 42.5\%$ における測定結果

$$Y = 6.28 \times \frac{2H}{[4-H]^2} \quad \left(\begin{array}{l} H: \text{指標硬度 (cm)} \\ Y: \text{Kg/cm}^2 \end{array} \right)$$

また図 6 の ● と e の関係式から走行回数 $N=10$ の時の指標硬度 (H) を求めると、深さ $0 \sim 10 \text{ cm}$ 間の容積重比の極限值は 1.349 であるから指標硬度 2.58 cm が得られる。またこれを貫入抵抗に換算すると 16.1 Kg/cm^2 が求まる。すなわちこの数値は本実験条件下における容積重比の極限值における土壤硬度に相当する。

圃場におけるトラクタの走行はもちろん本実験のように数回の走行が連続して繰返されることはほとんどなく、走行時における圃場条件はその時々によつてかなり違つてくる。また接地圧も作業内容によつて異なるから前述した踏圧試験の結果は更に複雑な要因の解析をまたなければならぬ。しかしながら、両耕起区の耕土直下の土壤硬度に数年来余り変化が見られないこと、(表 6) またその指標硬度が踏圧試験より求めた容積重比の極限值における土壤硬度とはほぼ一致することなどから、両耕起区の耕土直下における土壤は 6 作期間におけるトラクタによる踏圧の繰返しによつて極限近くまで締まり、ほぼ安定化していることが推定される。

一方圃場作業に伴うトラクタの車輪踏圧の状況であるが、これは図 7⁴⁾ に示すように作業の種

図 6 は容積重比の増加に伴う土壤硬度の変化を図示したものであるが、この結果指標硬度 (山中式硬度計) は e の変化に対して直線的關係にあることが認められた。

指標硬度 (H) と貫入抵抗値 (Y) との間には次の関係があるから²⁸⁾³²⁾ 指標硬度の測定値から Y を求め、 e と Y との関係を図示すると図 6 の曲線が得られる。

類によつて2つの型に分けられる。(a)図は耕起作業(ボトム・プラウ)に伴う踏圧の状況を示したものであり、また(b)図は耕起後の管理作業ならびに収穫作業に伴う状況を示している。圃場における土壌硬度の実態(図3)は、このような車輪踏圧の状況を良く反映しているように考

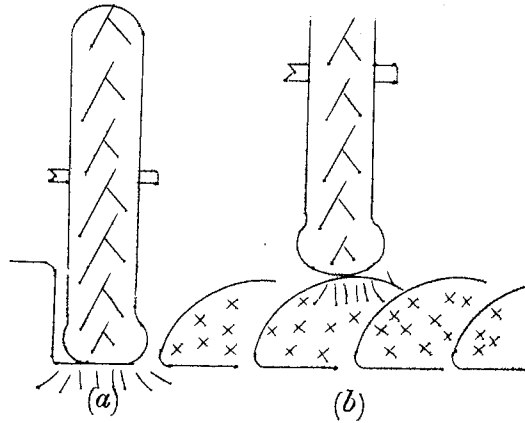


図7 wheel による踏圧状況

- (a) ボトム・プラウによる耕起時の踏圧(下層踏圧)
- (b) 圃場管理, 収穫作業時の踏圧 (表層踏圧)

察される。以上圃場における土壌硬度調査結果, 踏圧試験結果ならびに踏圧の状況などから, 圃場における土壌硬度の増大は主としてトラクタの車輪踏圧に伴う土壌の圧縮によるものであり, 圧縮によつて土壌硬度が高まった土層(踏圧層と仮称)は農作業に伴う踏圧の状況によつて耕土直下と耕土内にそれぞれ形成されることがわかつた。

両者は踏圧層形成の過程から見ても明らかに区別して考えられるが, また形成された踏圧層の位置(深さ)によつて作物に対する影響が異なると考えられる。¹²⁾³⁴⁾³⁵⁾そこで筆者は表層踏圧によつて形成された踏圧層を表層踏圧層, また下層踏圧によつて耕土直下に形成された踏圧層を下層踏圧層と仮称し, 両者を区別することにした。

3) 表攪耕区および反転耕区の作物の生育収量

現在試験を継続中のため最終的な結論は得られていないが, 6作目までの結果から両耕起区を比較すると表8に示す通りとなる。なお表攪耕区は3作目より設置したので表に示した結果は3作目から6作目までの4作物についての比較である。

収量についてみると表攪耕開始後3作物については両耕起区に差はほとんど見られないが, 4作目の実取コーンの収量は明らかに表攪耕区が勝つた。

作物の生育状況を比較すると, 大麦では反転耕区の後期の生育量が勝り, 実取コーンにおいては初期生育は表攪耕区が著るしく勝るが後期の生育は反転耕区が勝る傾向が見られた。

次に両耕起区の根系を水中篩別によつて調査した結果を大麦について比較すると表9の通りである。この結果は表2に示した結果と同様の傾向で, 表攪耕区の深さ7.5cm以下の根の伸びは反

転耕区と比較して著るしく悪く、根系が非常に浅いことが特徴として認められる。

表 8 耕起法の違いが作物の生育収量に及ぼす影響

a) 生育量

項目 月 日	5作目大麦乾物重(1m間隔)				6作目トウモロコシ乾物重(10株)		
	12/19	2/21	3/18	4/17	7/20	7/27	8/24
表攪耕区	3.02	14.1	26.3	114.7	28.0	83.1	230.0
反転耕区	3.04	15.3	32.0	127.3	15.7	69.4	240.0

b) 収量

(子実重Kg/10a)

項目 処理区	3 作 目	4 作 目	5 作 目	6 作 目
	小 麦	大 豆	大 麦	トウモロコシ
表攪耕区	361	222	467	384
反転耕区	345	223	446	330

表 9 大麦根系調査結果

(Kg/10a)

表攪耕	根 重	反転耕	根 重
0~7.5 cm	299.0	0~7.5 cm	257.0
7.5~15.0	77.5	7.5~15.0	132.0
15.0~22.5	62.5	15.0~22.5	79.1
0~22.5	439.0	0~22.5	468.1

- 注 1. 昭和40年4月7日大麦生育期間に測定した。
 2. 測定は大麦残渣の分布調査の場合と同様の方法で行った。
 3. 0~7.5cm間の根重には両耕起とも切株が若干含まれている。
 4. 栽培法はドリル播(18cm全面ドリル)によった。

なおこれらの生育状況ならびに収量結果に対する解析はほとんど行っていないので、これらに関する知見は得られていないが、両耕起区の土壌の理化学的特性から見て、作物生産との関係は単に土壌養分の問題に限らず、土壌物理性の面から詳細な検討が必要と思われる。

III 結 論

大型機械導入に伴う土壌の理化学性の変化を明らかにするため、表面攪土耕および反転耕を対

比させながら、両耕起法の違いが土壌の理化学性に及ぼす影響を検討した。

これらの結果を要約すると次の通りである。

1) 両耕起区の化学性について三要素の養分含量を深さ別に比較した結果、各要素とも表面攪土耕区の耕土が最も勝り表層の肥沃化が認められたが、その肥沃な土層は極めて浅く浅耕土化の傾向が認められた。また反転耕区の耕土は表攪耕区の耕土より肥沃度は劣つたが、耕土の深さでは明らかに反転耕区が勝つた。

このように耕起法の違いによつて層別別の土壌肥沃度が異なる原因を検討した結果、機械による収穫で比較的多量に還元される作物残渣、あるいは施肥磷酸の残効（蓄積磷酸）の累積効果が耕起深度によつて異なるためであることがわかつた。

2) 土壌の物理性の変化を層別別に比較した結果、両耕起区とも耕土直下5～10cmの厚さの土壌の固相率の増大が顕著に認められ、それに伴つてその層における土壌の透水性の低下、土壌硬度の増大が顕著に認められた。また土壌水分の消長を表層0～15cm間の土壌について比較した結果、固相率の高い表攪耕の水分率は明らかに反転耕区より勝つた。

またこの原因を固相率の増加に伴う孔隙の変化から検討し、固相率が増加したのは粗孔隙が減少し毛管孔隙が増加したため、その結果保水力も高まつたことがわかつた。

圃場における踏圧層の形成について、踏圧試験、圃場における土壌硬度の実態、ならびにトラクタの車輪踏圧の状況から検討し、大型機械導入に伴う踏圧層の形成は主として農作業に伴うトラクタの車輪踏圧によるものであり、踏圧の状況によつて耕土直下および耕土内にそれぞれ踏圧層が形成されることがわかつた。

踏圧層形成の過程ならびに作物に対する影響を考慮して両者を区別し、前者を下層踏圧層、後者を表層踏圧層と呼ぶことにした。

圃場試験において認められた踏圧層は、反転耕区は下層踏圧層、表攪耕区は表層踏圧層に相当する。

また農作業に伴うトラクタの走行回数と土壌物理性の変化との関係を明らかにするため、裸地圃場（自然断面）において踏圧試験を行い走行回数と容積重の変化、それに伴う土壌硬度の変化などにつき検討を加え、これらの関係を明らかにした。

なお本実験は極めて限られた条件下における試験結果であつて、土壌の種類、土壌水分³³⁾、下層土の状態（下層土の膨軟）等単に土壌条件を考慮しただけでも検討すべき多くの問題が残されている。

終りに本研究にあつて種々懇切な指導を受けた徳永美治研究室長、鈴木達彦前研究室長に厚く感謝の意を表すると共に、分析の一部を担当した深山技官ならびに共同研究者の労を多としたい。

引用文献

- 1) 佐藤清美：土壤の物理性(10) (1964)
- 2) 望月武雄他：弘大農報(9) (1963)
- 3) 常松 栄：農機誌23:87~89 (1962)
- 4) William R. Gill, Agr Eng 40(7) 392~394 (1959)
- 5) 米田茂男：農園 29:5~10 (1954)
- 6) 佐藤清美他農業技術:18:401~405 (1963)
- 7) Phillips, R.E., and Kirkhan: Soil sci soc Amer Proc 26(4)
(1962)
- 8) 渡辺・仁紫・石井：日土肥誌23:77 (1952)
- 9) 作物試験法：農業技術協会 (1956)
- 10) 出井・浜崎：九州農試彙報 3:387~397 (1956)
- 11) 渡辺他：農事試研報(5) 1~44 (1963)
- 12) 農事畑作部試験成績書 畑作部・畑土研 昭和38.3.9 (未発表)
- 13) 山本・宮里：日土肥誌講演要旨(11) 79 (1965)
- 14) 試験成績書，農業技術研究所化学部 才5研究室 昭和34
- 15) ソ連農業技術資料(7)，農林水産技術会議事務局 調査課 (1964)
- 16) 菅野一郎：農業技術 14:211~215 (1959)
- 17) 江川・関谷・飯村：農技研報，B(7)31 (1957)
- 18) 竹中 肇：農土研(7)別冊，68~75 (1963)
- 19) 美園 繁：日土肥誌，33:48~58 (1962)
- 20) 美園 繁：農技研報，B(11) (1958)
- 21) 米田茂男：土壤の物理性(2) (1962)
- 22) 吉良芳夫他：農技研報，F(12) 117~209 (1960)
- 23) 吉良・安保・相馬・伊藤：農土研(7)別冊76~80 (1963)
- 24) Free G. R Agr Eng, 34(8), 528~530 (1953)
- 25) Phillips, R. E. Kirkhan, D: Agron, J, 54:29~34 (1962)
- 26) 涌井 学他：農機誌，12(1.2)27~31 (1951)
- 27) 美園 繁：日土肥誌，34 (1963)
- 28) 農事試畑作部試験成績書，農事試畑作部 機械化研究室 昭和37年度

- 29) 出井・浜崎：九州農試彙報3, 399~411 (1956)
- 30) 試験成績書, 東海近畿農試 土肥研究室 昭和38.3.9
- 31) 田淵俊雄：農土研(7)別冊 (1963)
- 32) 山中金次郎：日土肥誌 33:343~347 (1962)
- 33) 佐々木次郎：農土試報告(1) (1963)
- 34) 試験成績書, 北海道農試畑作部 土壤改良研究室, 昭和38, 3.9
- 35) " " 長野農試桔梗原分場 土壤肥料研究室 昭和39
- 36) 山田 忍：土壤の物理性 (1964)

水田転換ミカン園土壌の物理性について

愛媛県農試 丹原 一 寛

I はしがき

近年、果樹園造成は水田地帯にまでおよんでいるが、愛媛県ではこれらはほとんどミカンが作付けられる計画である。これまでも水田が果樹園化された例がないではないが、それらは大部分が水利や土地の条件が水田として不向きなものが多かった。しかるに近年の傾向は、これらの土壌が主に灰褐色系、黄褐色系の地下水の低いものに限定されているとはいえ—水田として十分な生産力のある耕地が、ミカン園に転換されている。

水田土壌は、生成的要因や長期にわたる肥培様式に由来する土壌の性状が、畑地の樹園地にくらべてかなり相異すると予想される。

その意味で、問題の所在を明らかにするためには甚だ不十分であるけれども、このような転換ミカン園の土壌構造に関する若干の調査結果を取りまとめたのでここに報告する。

この土壌の3相構造に関する課題は、これからさらに広範な研究を必要としているが、これまでに農技研美園技官、川尻技官らの熱心なご指導をいただいている。厚くお礼を申し上げる次第である。

II 調査地域の概要

調査は、愛媛県伊予市で行なつた。開園計画は約100haが予定されており、そのうち約3割がミカンの植え付けを終つている。

和泉砂岩山麓の狭少な洪積層と、これに連続する沖積地帯にあり、ゆるやかに傾斜する棚田であるが、現在では水田と転換園が交錯している。転換園の一部ではブルドーザーによつて深耕が行なわれている。ミカンは定植後1～2カ年を経過したものが大部分を占める。

土壌の第1層は13～15cm、その下部に厚さ約20cm程度のち密な鉄の集積層があり、土性はいずれも壤土である。さらに下層はち密な第3層があり、土性は場所によつて壤土乃至埴土で、部分的に円礫に富んでいる。深耕は主にち密な第2層の破砕が目的とされ、ほぼ30～35cmの深さまで混層されている。これらの水田は、水稻52.0kg/aを得る乾田であつたが、施肥改善事業による調査では、灰褐色壤土マンガン型に分類され、地下水位は低い。

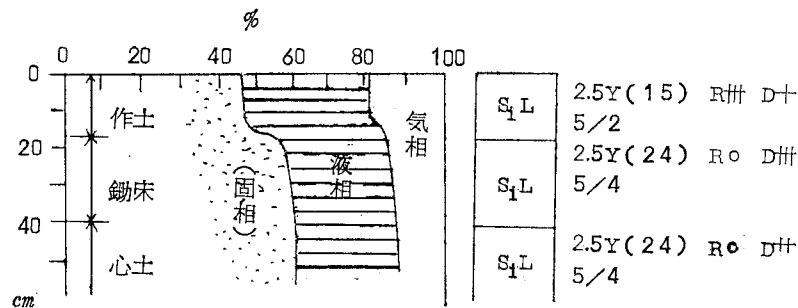
III 調査の方法と結果

深耕園と、その近傍の深耕処理を行なわなかつた園を1対として、土壌断面調査および試料採取を行ない、土壌の三相分布を求めた結果を第1図にしめた。調査は1964年3月から4月にわ

たつて行なつたが、土壤水分はすべて吸引法により $pF1.5$ としてあらわした。およそ $0 \sim 10 \text{ cm}$, $20 \sim 30 \text{ cm}$, $30 \sim 40 \text{ cm}$ の深さから採土したが、無処理園では、それぞれ、作土、鋤床、心土に該当している。

三角座標における土壤3相のそれぞれのしめる範囲をみると、無処理園の場合、作土は固相率が $40 \sim 50 \%$ 、水分率 $33 \sim 46 \%$ 、空気率 $10 \sim 26 \%$ の範囲をとり、鋤床層では固相率が $50 \sim 63 \%$ となつていて、作土にくらべて明らかに固相の充填度が高く、水分率はほぼ $30 \sim 40 \%$ の間にあり、作土よりやや小さい範囲をとつてはいるが、作土とくらべるとかなりの部分にわたつて重なり合つている。空気率も、作土より小さく、ほぼ $14 \sim 15 \%$ となつている。

深耕園の場合は、混層が行なわれた 30 cm までの深さの土壤は、1層、2層ともに土壤3相の分布範囲が等しく、固相率では $38 \sim 58 \%$ 、水分率 $28 \sim 41 \%$ 、空気率が $3.5 \sim 5 \%$ をしめし、無処理園にくらべると、試料の大部分は固相率が小さく、空気率を増している。第1層では、深耕園が無処理園よりもいく分水分率が小さいが、第2層については無処理園、深耕園ともに水分率の占める範囲に大きい差はみられない。 30 cm 以下については、採土の場所によつて、土性の相異、円礫の存在などの影響であると考えられるが、測定値はかなり乱れている。けれども、3相の分布範囲は深耕の有無に拘らず大きい差がなく、無処理園では、鋤床層とほぼ同じ範囲に入つている。



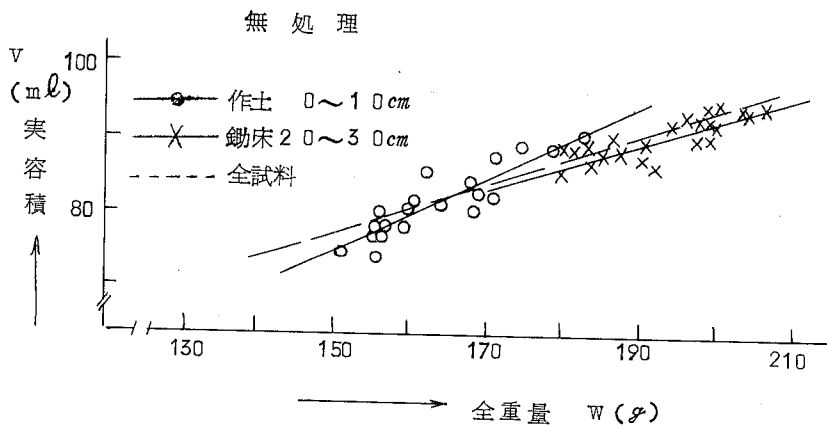
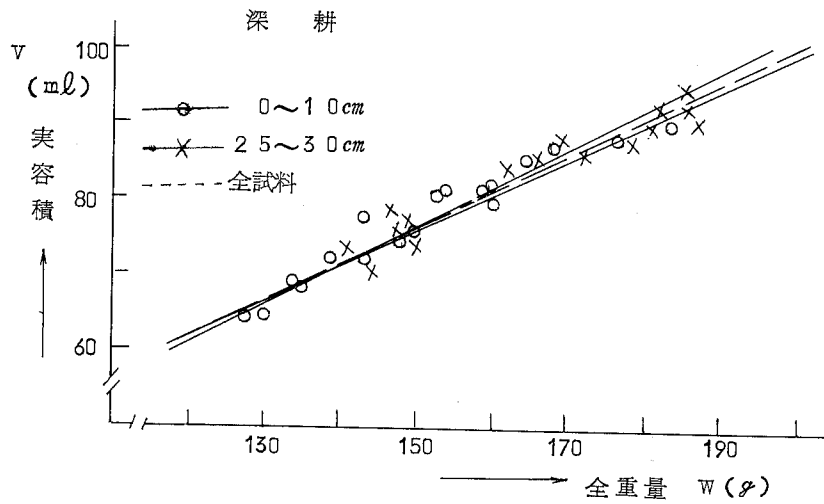
R: ミカンの根群, D: 酸化沈積物

卅... 含む, 卍... 含む, +... 僅少, ○... なし

() の数字は山中式硬度計の読み数 mm

才 2 図 土壤断面の三相分布

第2図は、これらの土壌の1例について、断面の三相分布をしめしたものである。この地域内では最も古くミカンを作付けした園で、深耕は行なっていない。作土より下層は、固相率が60%におよんでいるが、空気率は鋤床の位置で15%存在し、さらに下層では10~12%となっており、全体として水田土壌としてはかなり多くの空気量を含んでいる。また、水分率は作土が大きく、鋤床層以下で少なくなっている。現在、樹令は12年に達しており、これまでの生育経過は良い方であるが、根群分布をみると、ほとんど15cm以内の作土層のみに限られていて、直径1~2cmの中根は、作土と鋤床層の境を横方向に沿って伸長している。深耕園の根群分布の様相についてはミカンの定植後の日が浅いためまだ何ともいえないけれども、ち密な鋤床層の存在は、根の伸長に対して機械的な障害となるものとみられる。



第3図 土壌の全重量と実容積との相関

第3図は、土壤の全重量Wと実容積Vとの相関関係をしめしたが、直角座標上におけるこれらの測定値の分布は、深耕園と無処理園とで特徴的な差がみとめられる。すなわち、深耕園では、第1層、第2層ともに、W、Vの分布範囲はほぼ一致しているが、無処理園をみると、Wの値は鋤床層が作土より大きく、Vについても鋤床層が概して大きい値をとっている。統計処理の結果は、第1表に掲示したように、深耕園では表層、下層ともに相関係数rが0.97、回帰係数mの相対誤差 $\Delta m/m$ は0.13をしめし、全試料についてはrが0.98、 $\Delta m/m$ 0.08となつて、これらの相関はかなり良く、WとVとの関係は次の(1)式であらわされている。

第1表 重量-容積，固相-液相，固相-水分固相率，相関関係

		深 耕			無 処 理		
		0~10 cm	25~30 cm	全 試 料	作 土	鋤 床	全 試 料
* W V 相 関	r (相関係数)	0.97	0.97	0.98	0.90	0.86	0.94
	m (回帰係数)	0.499	0.473	0.480	0.504	0.336	0.328
	C (常数項)	1.87	5.62	4.62	4.38	29.31	31.18
	ℓ (mの幅)	± 0.064	± 0.060	± 0.039	± 0.120	± 0.091	± 0.046
	$\Delta m/m$ (mの相対誤差)	0.13	0.13	0.08	0.24	0.27	0.14
** Sv Mv 相 関	r	0.42	0.47	0.47	0	0.44	0.55
	m'	0.229	0.220	0.232	-0.012	-0.362	-0.275
	C'	23.79	24.51	23.79	38.59	54.95	50.11
	ℓ	± 0.265	± 0.220	± 0.150	± 0.514	± 0.333	± 0.131
	$\Delta m'/m'$	1.16	1.00	0.65	4.28	0.92	0.48
*** Sv Mv / Sv 相 関	r	0.72	0.76	0.75	0.58	0.79	0.91
	m''	-0.0116	-0.0109	-0.0109	-0.0175	-0.0160	-0.0193
	C''	1.289	1.265	1.261	1.634	1.517	1.709
	ℓ	± 0.0056	± 0.0049	± 0.0033	± 0.0123	± 0.0056	± 0.0028
	$\Delta m''/m''$	0.48	0.45	0.30	0.70	0.35	0.15

* $V = mW + C$, ** $Mv = m'Sv + C'$, *** $Mv/Sv = m''Sv + C''$

$$V = mW + C \quad \text{----- (1)}$$

無処理園の作土および鋤床層については、 r がそれぞれ 0.90, 0.86, $\Delta m/m$ は 0.24 以上になつて、深耕園にくらべてこの相関はかなり落ちるが、全試料については r 0.94, $\Delta m/m$ 0.14 となり、近似的にはほぼ(1)式が成立していると思われる。

(1)式の回帰係数 m の値は、土壤 3 相構造の特性をあらわすと考えられるが、深耕園の m の値は第 1 層が 0.50, 第 2 層が 0.47, 全試料では 0.48 となり、これらの誤差の幅はいずれも重なり合うために、 W , V の値は土層の別なく、ともに同じ直線に沿つて分布し、土壤の構造特性に差はないことをしめしている。

さらにまた、深耕園の m の値が 0.47 ~ 0.50 付近にあることから、これらの土壤が、いずれも固相優位の構造変化を特徴としていることが分る。第 1 図にもしめされているように、固相率の分布範囲が水分率のそれよりも広く、土壤の水分変化が固相変化に対応しない特徴をしめしている。

無処理園の場合、 m の値は作土が 0.5, 鋤床が 0.34 となつていて、かなりのひらきがみられ、その誤差巾をみると明らかに両者の間には差がある。また全試料については、 m の値は 0.33 となつて、深耕園の 0.48 にくらべても明らかな差がみられる。これらの結果は、深耕園と無処理園との間に、あるいは無処理園では土層別に、土壤の構造的特性の相異があることを示している。

土壤の全重量と実容積との関係が(1)式でしめされるとき、固相率 S_v と水分率 M_v との関係は、理論的には次の(2)式でしめされる。^{1, 2)}

$$M_v = m' S_v + C' \quad \text{----- (2)}$$

第 1 表に、この関係を検討した結果を掲示したが、相関係数 r はいずれも 0 ~ 0.47, 回帰係数 m' の相対誤差 $\Delta m' / m'$ はきわめて大きく、また全試料についてみても、この相関はみとめられない。

しかしながら、美園氏が提唱した土壤構造量の一つである水分-固相率 $(M_v/S_v)^{1)}$ を、 S_v との相関関係でしめた場合は、第 1 表に掲示したように、相関係数 r はいずれも 0.6 以上となり、両者の関係を(3)式でしめたとき、回帰係数 m'' の絶対値は小さいが、その誤差はさらに小さくなつてい

$$M_v/S_v = m'' S_v + C'' \quad \text{----- (3)}$$

しかしながら、深耕園、無処理園とも土層別の $\Delta m'' / m''$ は大きく、これらの相関関係はみとめ難いけれども、全試料をみると深耕園では 0.30, 無処理園で 0.15 となり、相関はかなりよくなつてい

M_v/S_v の値は、表示していないが、どれも 1.0 以下となつており、土壤 3 相は水分よりも固相が卓越する構造的特性をしめているが、係数 m'' が負となつてい

また園の種類で m'' の値が異なるのは、これらの園の水分率、固相率のそれぞれの増減関係が異なっているものと考えられる。

Mv/Sv を Sv との相関関係でしめしたとき、全層を通じては、(3)式がほぼ成立しているけれども、 $Sv-Mv$ の相関がみとめられないことと合せて考えるとき、 Sv と Mv との関係が単純な1次式ではなく、2次式としてあらわされる可能性も生じてくるが、これらは今後十分な検討を必要としている。

また Mv/Sv の値は、無処理園の作土は1.1～0.7、鋤床層は0.5～0.7となつて、土層別の差が明確である。深耕園では土層の別なく0.6～1.0の間にあつて、園別にも Mv/Sv の範囲にかなりの差がみられる。

第4図はpF1.5とpF4.2との水分差を有効容水量(M_{AWC})として、固相率との相関をしめした成績である。pF4.2の水分は、pF1.5測定終了後の試料それぞれを、所定の遠心力を作用させて求めた。有効容水量の範囲は、深耕園では1層、2層とも14～24%の間にあるが、無処理園では作土16～28%、鋤床層8～18%となり、土層別にかなりの差がある。また深耕園では M_{AWC} と Sv との間の相関は全然みとめられないけれども、無処理園では相関係数0.87、回帰係数の相対誤差0.19となり、かなり相関はよくなつており、固相率の増加が保水性の減少を伴う傾向をしめしている。また深耕園では14%以上の有効容水量をしめすが、無処理園では、固相率54%付近から、それ以上の固相率の範囲では、有効容水量は14%以下となつている。

IV まとめ

以上、主に土壌の3相構造の特性について検討してみたが、水田転換のミカン園土壌は、水田期間のうちに生成したとみられる土層の分化が、作土層、鋤床層と、きわめて明瞭である。ブルドーザ-深耕は、この鋤床層破砕が目的で行なわれているが、一般的には、深耕処理は固相率を減少させ、空気率を増加させている。

土壌の全重量と実容積との相関関係では、これらの測定値が直角座標のうえでしめす分布範囲ならびに回帰直線の差から、土層別ならびに深耕、無処理の園別に、構造変化の特徴がかなり相異しているものと予想された。しかしながら、理論的には、この全重量-実容積相関から導き出せる固相率と水分率との相関は、実験の結果からは成立せず、むしろ水分-固相率と固相率との相関としてあらわされている。固相率と水分率との関係は、(2)式のような1次式ではなく、むしろ2次式としてあらわされる可能性がみられる。

このような各相関関係を通じて、これらの土壌は、いずれも固相優位の構造変化を特徴としていることがしめされ、鋤床層は固相率が大きく、空気率が少ないのみか、保水性も小さくなつている。また鋤床層の存在は第2図に例示したように、ミカンの根群分布を妨げる要因となつているものと

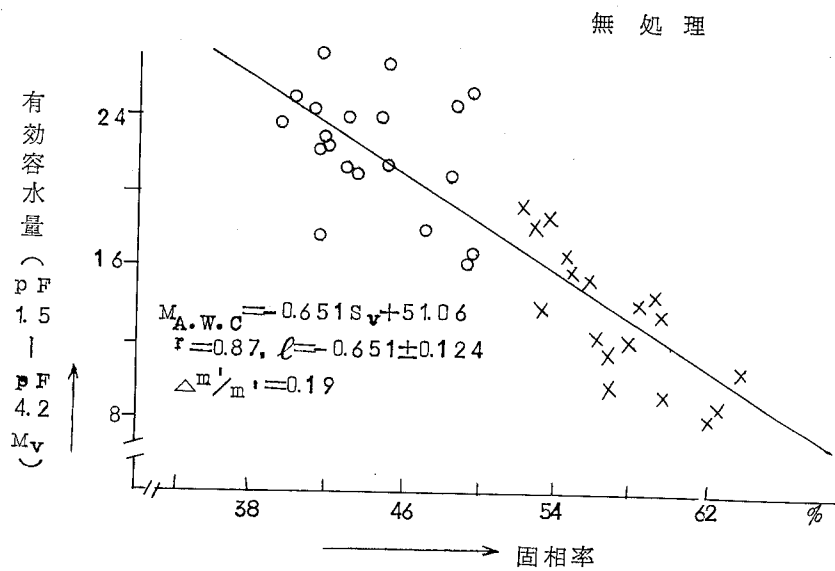
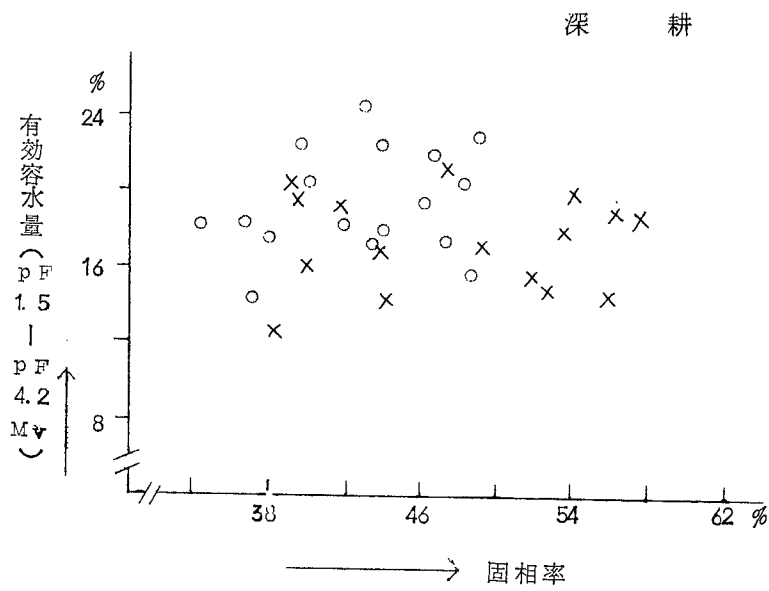


図 4 固相率 S_v と有効含水量 $M.A.W.C (M_v)$ との相関

想像されるが、このような土壤の物理性の特徴は、畑地樹園地の生育不良なミカン園土壤と、多くの点で類似している。³⁾

水田ミカン園はその地形的立地条件からみて、傾斜畑ミカン園にくらべて年間を通じての土壤水分の動態は相当に異なるものと予想される。また深耕処理によるち密な鋤床層の破碎が、根群分布、樹の生育におよぼす影響についても現在の時点ではまだ明らかでない。これらの諸点はいずれも今後の生育経過ならびに多くの調査研究を必要としていると考えられる。

引 用 文 献

- 1) 美園ら：土肥誌32. P.503.(1961), 33. P.48 (1962)
- 2) 木内ら：土肥誌35. P.33 (1964)
- 3) 丹原ら：土肥誌投稿中

土壌水運動理論の諸系列 (1)

— その内容 と 評価 —

浸透理論体系化研究グループ

I はしがき

執筆担当 東大農 田 淵 俊 雄

土壌水の運動は従来、主として土壌学、土質力学、地下水学、自然地理学等の分野で取扱われてきており、さらに一般的な多孔体中の流体の運動としては石油工学、粉体工学の分野でも研究がおこなわれてきている。

一方、これを水の運動形態の方からみると、世界的には、飽和領域の運動は地下水学や土質力学の分野で、不飽和領域の運動は土壌物理学の分野で研究されているとすることができる。ところで、わが国の土壌水運動学は現在主として農業土木学の中でその研究が進められている。そこではアースダム、土水路、地下水における土壌水運動が取扱われているばかりでなく、水田もまた重要な対象としてとり上げられていて、そこには世界的にもユニークな「水田における浸透」の研究が独自の発展をとげつゝある。最近ではこれに「畑地における水の運動」の研究も加わるようになった。このように日本における研究は、その中に個性のある分野をもちつつしかもそれを飽和から不飽和への橋渡しとして、広い分野の研究対象をもっており世界的にみてもかなり特色のある地位を築いてきている。

土壌水運動学はこのように特徴ある歴史と広い応用分野をもっているにもかかわらず、それらを系統立てて一つにまとめた文献はほとんど見当たらない。そのためこの道への入門者はむろんのことベテランの研究者でさえもが、大へん不便を感じている。一方また欧米において発達した水分ポテンシャル概念とその不飽和領域の運動理論が日本に紹介されるに当つて、ある種の混乱が飽和領域の運動学にまで及ぶという事態も生じた。このような混乱を防ぐためにも土壌水運動の理論を総合的に取扱つた文献の早急な出現が何としても望ましい。むろん飽和から不飽和までを包含した土壌水運動学の全分野のこのようなまとめは誠に至難の業であらう。しかしこれをおこなうことは先に述べた日本の研究の立場からして、われわれ日本の研究者の責務であり、われわれのまさに試みるべき課題だと言つてよいだろう。

以上のような観点から非力を顧みず、われわれは1964年春にグループを結成し、2～3年の長期間をこれに費すつもりで作業に着手した次第である。発足時におけるグループのメンバーは、

岩田進午, 大塚嘉一郎, 岡本雅美, 多田 敦, 田淵俊雄, 中野政詩, 中村良太, 福桜盛一, 八幡敏雄, 矢橋晨吾の10名であるが, 固定的なものではなく流動的な構成をとる方針である。作業のすすめ方としては, 当分の間ひとつひとつの文献を調べながら批判を加え整理をおこなうという方法を探っている。対象が非常に膨大なのでいくつかの項目に分けてすゝめ, 各項目ごとにまとめて, そのつど発表していく予定である。

ところで, われわれが文献を読んでいく場合に, まず最初に文献を何らかの見地から分類し整理しないわけにはいかない。ところがこの分類そのものが実はわれわれの目的なのである。従つてこれはあくまで仮のものであり, おそらくは先にいつて修正される運命にあるものであるが, この点は予め諒承を戴かねばならぬ。こゝにわれわれが仮に採つた研究の系列はおよそ次の通りである。今回はこの中からBuckinghamの名で代表されている不飽和拡散型の研究を採り上げて報告する。(図1参照)

II 毛管ポテンシャルによる不飽和運動理論

執筆担当 東大農 中野政詩

(1) その起りとその発展経過

不飽和領域での土壌水の運動理論といえば誰しもが考えるのは, 何といてもまず毛管ポテンシャル派の不飽和運動理論であろう。Buckingham や Richards の名とともにその呼び名のあまねく知られている毛管ポテンシャル理論とは, そもそもどのようにして起り, どのようにその理論を展開させているのか。ここではまずその起りとその発展のおよその経過とを概観しておこう。

毛管ポテンシャルによる土壌水の不飽和運動理論は, 1898年のBriggs⁽¹⁾の論文「土壌水の力学」から進展したと考えられる。これは土壌を球の集合体とみなした場合の土壌の保水機構とそこにある水のマイクロな移動機構を説明したにすぎないものであつたが, その基本的な考え方は, Buckingham⁽²⁾ や W.Gardner⁽³⁾ に受け入れられ, 土壌水の不飽和運動理論の基盤に組みこまれた。

Buckingham と W.Gardner は, 土壌中の水の移動を土壌中の水の流れとして解析しようとした研究者たちであるが, 両者はややちがつた扱い方をみせている。Buckingham は, Briggs の考え方を昇華させて流れの運動方程式を確立しようとしたが, W.Gardner は Briggs の考え方をマイクロな運動を説明するものとして受け入れて, 流れの解析にはSlichter

この原稿の討論には多田敦, 田淵俊雄, 中野政詩, 中村良太, 矢橋晨吾, 八幡敏雄が参加した。

の影響を受け連続方程式の併用に目を向けている。この2つの扱いは、1931年にR.A. Richards
によつて融合されたと考えることができる。

R.A. Richards⁽⁵⁾ が毛管伝導度を測定し、ポテンシャル方程式を導き、ある条件の下にそれを
解いてポテンシャル分布を求めたことは、われわれがよく知るところであるが、それらの結果を
生み出した基盤には、一部Briggs の考え方がみられると同時に、毛細管的モデルの設定がうか
がわれる。

第二次世界大戦の間にはさみRichards から数えて20年後の1951年に、Klute⁽⁶⁾ が
Crank & Henryの拡散方程式に対する考え方を背景にして、ポテンシャル方程式を拡散型方
程式に変形した。この性格や解法、適用範囲については、1956年にPhilip⁽⁸⁾ がとりまとめ
Soil Science に報告している。ポテンシャル方程式から拡散型方程式への変形は、ポテン
シャルで流れを考えて、水分量で現象を捕えるという点で、われわれに多くの便宜を与えたが、同
時に水分量と毛管ポテンシャル、水分量と拡散係数等々について多くの論議を呼び起こした。

W. Garduer, W.H. Gardner 等⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ はT線水分計による実験データに基づいてこれら
の点についてのかなり批判的な報告をおこなっている。

水分ポテンシャルによる不飽和土壌水分運動理論は、このように発生、展開し、現在尚いくつか
の問題を残している。それらを明らかにするために、以下にやや内容を詳しく述べてみよう。

(ii) Buckingham の毛管ポテンシャル理論について

一端を湿らした土の蒸発実験から土の中の水の移動を確認し、それを流れとして扱う。これが
Buckingham の研究の出発点であつた。流れを量的につかむにあつて、Buckingham は
流れの密度をとりあげ、それが何で与えられるかについて解答を与えたものが「土壌水の運動に関
する研究」と題する1907年の論文である。Buckingham の理論を一口で言えば、次のよう
なものである。土壌水の流れは、熱や電気の流れを表わすFourier の法則やOhm の法則と形
式的には全く同じ形で表わせるのではないか。ただそのときに、土壌の水に対する伝導性と水を流
す力が何であるか、どんな性質のものであるかの2点を明らかにすることが重要である。この2点
の考察に際し、Buckingham は、米国農務省土性局の先輩であつたBriggs の影響を大きく
受けている。

Briggs は、1898年に、土壌を球の集合体とみなしたとき、そこに保持される水は、毛管
負圧のちがう粒子接点のリング水へ粒子表面の水膜を伝つて移動することを明らかにした。
Buckingham は、この考え方に基づいて適用範囲を中程度の水分量状態の土壌と限定した上で
毛管伝導度と水分量との関係を理論的に求めた。またBriggs は、同じ理論で、飽和土壌の重力排水の地
下水面上に特徴ある水分分布が現われるメカニズムを、水膜の毛管力とそこにある水の重量との和

1800	1900	1930	1960
Newton	Navier, Stokes,	Atterberg,	Bingham,

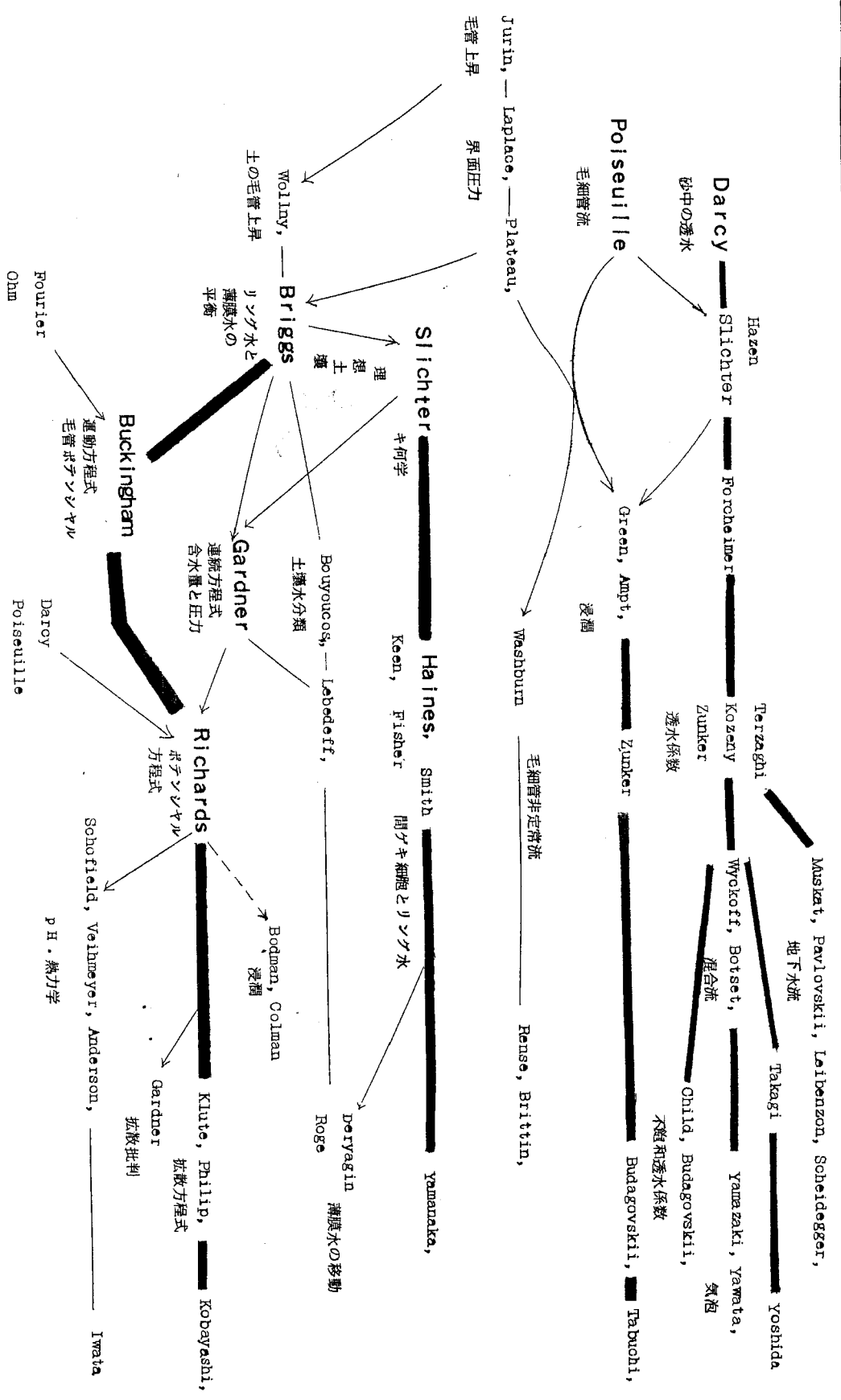


図1 研究の系列

の釣合で説明している。Buckingham は、この説明から水膜の毛管力が水分量により左右され、毛管力の差が水の流れを起こすものであるとの考えに到達し、土壤の毛管ポテンシャルとして保水力をとり上げ、仕事の定義から毛管ポテンシャルが位置の何倍かで表わせることを証明し、先の重力排水の際の水分分布からポテンシャルと水分量との関係を求めることができることを示した。

こうして、Buckingham は、

$$q = \lambda S \quad (2-1)$$

を導びき出し、提案した。ここに q は流れの密度、 λ は毛管伝導度、(水分量の函数)、 S は毛管ポテンシャル(水分量の函数)の勾配である。

論文の中で彼は(2-1)式の検証を最後に付け加えている。検証は、乾土と湿土を接触させその間の水分移動量を測定する実験によるもので、(2-1)式の λ に理論値を、 q に移動量を代入し、毛管ポテンシャルを求めて、先に求めたものと比較をするというものであるがうまく目的を果すことが出来なかつたようである。

(iii) W. Gardner の毛管ポテンシャル論について

土壤水の運動を流れとして解析しなければならないという考え方は、すでに1907年、Buckingham が主張し、その方向の研究をまとめていることはすでに述べた。しかし、W. Gardner にそれを教えたものは、Slichter⁽⁴⁾であつた。Slichter は、1898年に、Darcy式と連続方程式とを使つて地下水の流れを解析していた。

一方、土壤中の水の運動についての 実体的な考え方をW. Gardnerに教えたのは、Briggs である。すでに述べたように Briggs は、薄膜の圧力か

$$P = 2T \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (3-1)$$

で与えられることを述べ、この圧力の勾配が薄膜状の水を動かす力になつてゐることを説明した。ここに P は薄膜の圧力、 T は表面張力、 r_1 、 r_2 はそれぞれ薄膜の曲率半径。W. Gardner は、これをリング水にあてはめた。というのは、水分量を決定するものは、粒子表面に附着した膜状の水よりも接点に形成されるリング水であるという考え方をしたからである。リング水の体積を曲率半径の関数として求め、リング水の体積と圧力の関係を導いた。これが運動方程式(ストークスの法則から類推した仮定)と連続方程式とを結びつける橋渡しになつてゐる。

われわれが論文を読んで目につくことは、(1)毛管伝導度が定数として数式の展開に使われ、求めた方程式の中にそのように位置することと、(2)最終的な基礎方程式が水分量に関する方程式になつてゐることである。後者の問題は、W. Gardner 以後の研究を追つていくときに、よく注意していくとよい。

(iv) Richards の毛管ポテンシャル理論について

Richards は、論文の始めに土壌水運動の実体について考察し、土壌水のもつポテンシャルについて述べているが、この議論の基礎はBriggs からW.Gardner へつながる球の集合体モデルに基づく考え方である。ところが、彼が流れとして問題を捕えたときに（つまり、運動方程式についての議論を始めたときに）この考え方は消滅してしまつた。

すなわち土壌水の流れについてRichards は、不飽和状態での土壌水の流れは飽和状態で流れる部分が局在するような流れであると考えた。従つて、Darcy式の比例定数を水分量の関数とすれば、Darcy式が使えると結論づけた。これは一般にDarcy式の拡張解釈といわれているが、むしろ毛細管モデルを新しく設定し運動方程式についての仮定の基礎を与えようとしたものであると解釈すべきであろう。

Richards は、このDarcy式とW.Gardnerにより導入された連続方程式とから、いわゆる、ポテンシャル方程式を完成し、毛管ポテンシャルと水分量との関係を一価連続と仮定して、これをポテンシャルに関する方程式に変形した。この点は、毛管伝導度を毛管ポテンシャルの関数として実測したことと合わせて注目すべき点であろう。

毛管伝導度と毛管ポテンシャルの関係が直線的と考えられる水分領域について、この方程式を解き、重力排水をうけた土層の垂直方向ポテンシャル分布を求めているが、ヒステリシスについてはヒステリシスが土壌構造が変化するためにあらわれるものであるという考え方と、毛管伝導度-ポテンシャル曲線に大きな影響を与えないという考え方とから、さほどこれを重要視しなかつたようである。

(v) Klute の毛管ポテンシャル理論について

1949年、Crank と Henry は拡散係数(D)が濃度(C)の関数となつている拡散方程式

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (5-1)$$

の解が、 $2l$ の厚さを持つ平板を液体あるいは蒸気の中に置いたとき平板による液体あるいは蒸気の吸着現象を表わすであろうと考えて、その解析をしている。Kluteはこのときの数値解法に注目し、毛管ポテンシャルと水分量が一価連続の関係にあると仮定して

$$D = k \left(\frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) \quad (5-2)$$

とおき、Richards のポテンシャル方程式を水分量に関する方程式に変形し

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (5-3)$$

これを境界条件

$$\begin{aligned} \theta = \theta_0 & \quad x = x_0 & \quad t > 0 \\ \theta = \theta_n & \quad t = 0 & \quad x > 0 \end{aligned} \quad (5-4)$$

のもとに数値解法をした結果を報告した。

ここに ϕ は水分ポテンシャル, θ は水分量, x は距離, t は時間, k は毛管伝導度, D は拡散係数, ここで注目しなければならないことは, Klute が Richards とは反対に毛管ポテンシャルを水分量に変換したことである。われわれは, これを拡散型方程式の誕生と呼んでいる。

Richards のように毛管ポテンシャル分布が求められたとき, 流れの方向あるいは強さの解析はできる。また Klute のように水分分布曲線が求められたときには, 水分量によつて状態の指定ができる。方程式の型だけでなく, Richards の水分ポテンシャル理論と Klute のそれとの差がこの点にあることを見逃してはなるまい。

(v) Philip の毛管ポテンシャル理論について

Philip の論文は拡散型方程式の単純な場合でのより容易な数値解法の研究から始まり, 初期水分量や湛水深が与える複雑な条件のもとでの解法の研究へと進み, 得られた結果と実験との比較についてまとめたものである。Philip は, 土壌水の流れが拡散型方程式によつてあらわされ, 土壌水運動の諸現象は, 拡散方程式に初期条件, 境界条件を入れていた解によつて説明できると考えている。このような考え方は, 土壌水の流れの法則が十分な実態的観察の上で見つけられたものであるならば, 申し分なかつたと思う。しかし, 拡散型方程式が抽象化された過程では, このような段階は満足にはたどられなかつた。この点で彼が選んだ道は, 解析を有効ならしめるために(1) Darcy 式が成立すること, (2)毛管ポテンシャルおよび毛管伝導度が水分量の一個関数であること, (3)ヒステリシスが現われないこと, という三つの制限を置き, この制限の中でのみ有効であると規定することであつた。しかし, Philip の研究時点で毛管ポテンシャルによる不飽和運動理論は, 色々な問題点を残しながらも, 一つのまとまつた段階に到達していると言つてよいであろう。

(vi) W.H.Gardner等の毛管ポテンシャル理論および現在の毛管ポテンシャル理論の解釈

KluteからPhilipへと発展した拡散型方程式に頼るやり方に批判的見解をとる他のグループがある。それは, W.Gardner およびW.H.Gardnerに代表されるグループである。批判の対象は, (1)不飽和状態でDarcy式がなり立つかどうか, (2)毛管ポテンシャルが水分量の一個連続関数であるかどうか, (3)毛管伝導度が水分量の一個関数であるかどうか, (4)ボルツマン変数が水分量の一個関数であるかどうか, (5)拡散係数が水分量の一個関数であるとした点, の5点である。これらの点に批判の目を向けてはいるが彼等もまた毛管ポテンシャル理論を発展させるために努力しているグループである。というのは, 彼等が同調した部分に $q = -k \Delta \phi$ の式と連続方程式があるからである。2個の方程式からでは流れの解析が不可能であることは明らかであるにもかかわらず

ず、なお2つだけしか認めない理由は、(2)~(5)までを否定する実験データを自らつかんだからである。この際、実験データが正しく現象を表わしているかどうか、すなわちその測定の方法とその精度が問題となるが、彼等はこのため特に、 C_s^{187} を源にした γ 線水分計を考案し、これで得られたデータを基礎にしている。(2)~(5)までが成立しなければ、ポテンシャル方程式にもどらねばならない。しかしこのままでは流れを解析するには方程式が不足してしまう。そこで彼等はこれを実験式に求めているというのが現状である。この傾向は合理性と実証性とをともに要求する科学としてはむしろ正しい方向を向いているのではないかと思われる。

現在われわれは、灌漑排水の技術の基礎資料をえることを目的として土壌と水の関係を水分量で表わし、拡散型方程式の数値解がある範囲内で実験データと一致する点に注目して毛管ポテンシャル理論に頼る場合があるが、この場合のわれわれは、次のような手順を踏んでいるのだということを忘れてはならない。(1)毛管ポテンシャルの勾配が流量流速に比例すると仮定し、(2)両者を結びつける係数の逆数を毛管伝導度とよび、それが水分量の一価関数であると仮定し、(3)毛管ポテンシャルをテンシオメータで負圧としてとらえ、(4)ヒステリシスは湿潤過程、乾燥過程を使い分けて除外する。このようにしてみると土壌水運動理論としての毛管ポテンシャル理論にはGardner 達が指摘するように前提や仮定が多く、実地の応用にはまだまだ多くの危ぐを抱かせる状態である。それにもかかわらず、これらの仮定を土壌水の実態と結びつけて検証しようとする態度が、W.H.Gardner等のグループの他に見られないのはいかに残念に思われる。以上の経過を見たときに、現在の研究時点は、Buckingham, W.Gardner, Richards の時代と比べてさほどの進歩をとげたとは思えないのである。今後の地道な研究がこれらの点に解答を与えることを希望してやまない。

引用文献

- 1) Briggs, L.J.: The mechanics of soil moisture.
U.S. Dept. Agr. Bur. Soils Bull 10, (1897)
- 2) Buckingham, E.: Studies on the movement of soil moisture.
U.S. Dept. Agr. Bur. Soils Bull. 38 (1907)
- 3) Gardner, W.: The movement of moisture in soil by capillarity.
Soil Sci., 7, 4 (1919)
- 4) Slichter, C.S.: Theoretical investigation of the motion of ground water. U.S. Geol. Survey. 19th Ann. Rpt., 2 (1898)
- 5) Richards, L.A.: Capillary conduction of Liquids through porous mediums Physics. 1 (1931)

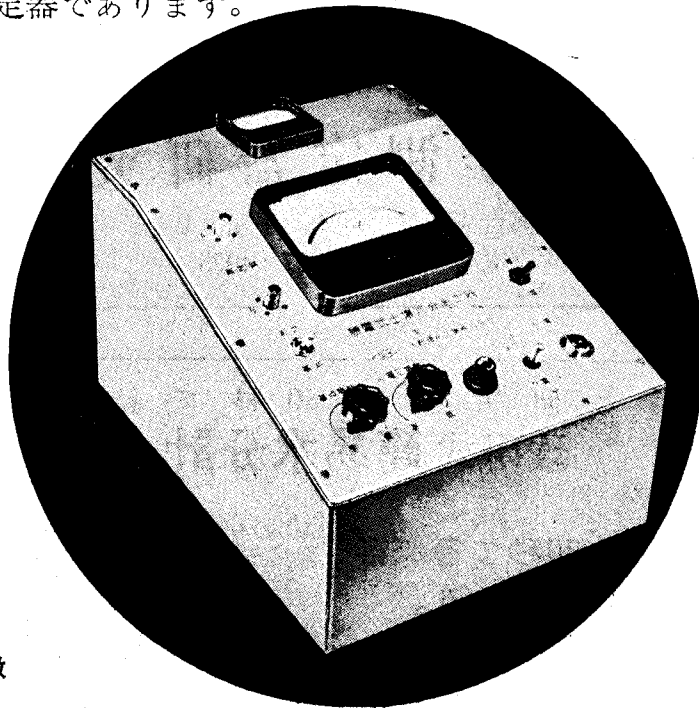
- 6) Klute, A: A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials. Soil Sci., 73(1952)
- 7) Crank, J. and Henry, M. E: Diffusion in media with variable properties. I. II. Trans. Faraday Soc., 45(1949)
- 8) Philip, J. R: The theory of infiltration I~II, Soil Sci., 83~85(1956~1957)
- 9) Gardner, W. H. and Gardner, W: Flow of soil moisture in the unsaturated state. Soil Sci. Soc. Amr Psoc. 15(1951)
- 10) Rawlins, S. L. and Gardner, W. H: A test of the validity of the diffusion equation for unsaturated flow of soil water. Soil. Sci. Soc. Amr. Proc., 27(1963)
- 11) Ferguson, H. and Gardner, W. H: Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption. Soil Sci. Soc. Amr. Proc., 26(1962)

農業技術に革新をもたらす

DIK誘電式土壌水分測定器

PATENT. p. 386877

本器は、在来の電気抵抗式、もしくは抵抗値を含めた静電容量式の水分計と全く異なり高周波誘電率のみによる土壌水分測定器で在来の水分計では得られなかったいろいろの特長をもつ全く新しい土壌水分測定器であります。



特 徴

- (1) 測定範囲が大きい
あらゆる土壌に対して、飽和～風乾に至る間の水分変化が的確に測定出来る。
- (2) 水分測定値が直線的である
 μA で表示される水分測定値は、圃場状態の実用的範囲において殆んど直線である。
- (3) 即応的である
埋没した感体は、直接土壌の誘電率を測定するので、測定時の水分をそのまま表示し時間的な遅れは全然ない。
- (4) 再現性がある
測定に当って、土壌には何の物理化学的変化を与えないで、連続的にくり返し測定ができ、同時にその再現性が十分に保証されている。



大起理化工業株式会社

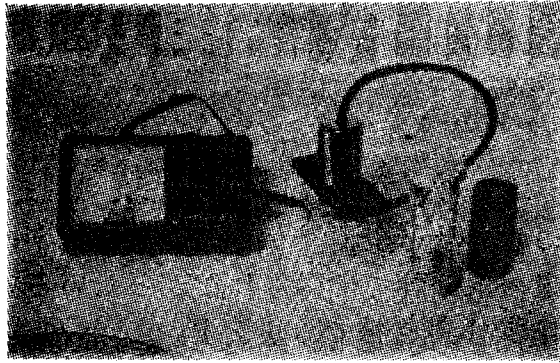
東京都荒川区町屋2丁目16-2
TEL 東京 (802) 2-1-91 (代表)

理研式酸度計

PHメーター

農産加工用、醸造用、
土壌調査用、酪農用、

簡易騒音計
疲労度検査器
ルクスメーター
各種科学計器



携帯用ケース付 ¥ 12,500

理研科学測定器研究所

東京都台東区東上野4の14の9

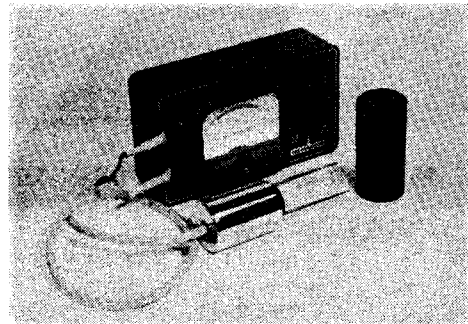
電話 (844) 4307・4925

現場と研究室を30秒で結ぶ!!

理研式簡易水分計

- 応答性が良く、30秒で答が得られ再現性が優れている。
- 堅牢で実用的であるので誰でもどこでもいつでも計れる。

(携帯用皮ケース付) ¥27,000
(電極(6cm)付)



1. 電極には高度の冶金工業技術の粋を集め開発された特殊金属を使用していますので、分極作用の影響をほとんど受けません。(電極の長さは6~50cmまで用途に応じ各種有ります。)
2. メータースケールは含水比、水分率を同時に示すように設計されています。
3. 農林省農業技術研究所土壌物理研究室で、約5ヶ年にわたり各種の圃場試験が行われた結果、本器の性能の優秀さが確認されております。

製造元 理研科学測定器研究所

総発売元 大有商事株式会社

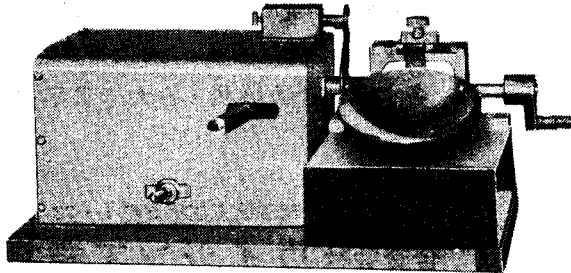
本社 東京都千代田区神田駿河台1の2 電話(292) 7201~4

大阪事業所 電話(921) 0625・6923 名古屋事業所 電話(94) 0447

丸東の土壤物理試験器

電動式液性限界測定装置 S O 2 B

本器は J I S A 1205 に準拠する液性限界試験を電動によって行なえるようにした装置です。人為的な落下速度の変動などの誤差を除去し、機械的な正確さで簡単に試験が行なえます。電動クラッチを切れば普通の手動装置としても使用できます。



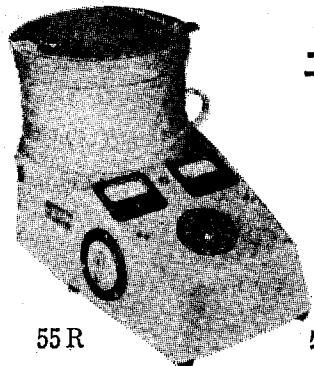
営業品目

土質試験機
コンクリート・アスファルト試験機
万能圧縮材料試験機

株式会社 丸東製作所

本社 / 東京都江東区深川白河町2の7 TEL 東京 (642) 5121(代表)
京都出張所 / 京都市中京区壬生西土居の内町3の1 TEL 京都 (84) 7992
北海道出張所 / 札幌市南十条西十三丁目970 TEL 札幌 (23) 0409

定評ある *marusan* の研究用遠心分離機



55 R

土壤水分測定用遠心分離機

土壤水分測定用遠心分離機

55 R (PF値 3.3以上) 回転数: 16,500 R. P. M
遠心力: 26,400 × G

90 A R (PF値 3.3以下) 回転数: 4,000 R. P. M
遠心力: 2,600 × G

- 特長
- 操作簡単
 - モーターは弊社特製にて耐久力大
 - 正確な P F 値の測定

株式会社 佐久間製作所

本社・工場 東京都大田区南六郷3の16番地 電話 (731) 1257・3170 (732) 0847
神田出張所 東京都千代田区神田多町1の9番地 電話 (251) 4 9 1 7・6 0 5 9
大阪アフターサービス出張所 大阪市北区綱笠町13-2 神光ビル一階 電話 (361) 7 7 6 3

自記マノメーター

硝子ゲージ管の水柱又は水銀柱の高さを自動的に自記します。

主要製品

土壤溶液採取装置(リチャード型)
精密自記蒸発計
簡易自記水位計
自記蒸発散位計
森式風向風速自画器
農業用微気象測定器各種
その他各種測定器設計製作

主な納入先

農業技術研究所・東海近畿農業試験場
関東東山農業試験場・九州農業試験場
各地農業試験場・各大学農学部

東京都世田谷区玉川甲賀町1-22

合資会社 **ウイジン工業社**

代表社員 森 武保
技術士

電話 (70)0531

堆肥不足に

テンボロン[®]

タバコ・蔬菜の苗床の土作りに
果樹園の土壤を若返らせ、樹勢を快復させる地力の素

メモ
テンボロンの主成分は熟成堆肥の成分である
フミン酸カルシウムを85% (完熟堆肥の約20
倍の濃度) を含んでいます。
したがって最近の堆肥不足をおぎなうために
最も適した化学堆肥です。

発売元



製造元



三菱商事株式会社

本社/東京・丸の内 電(211)0211(代表)

天北化学株式会社

本社/東京・神田 工場/北海道・幌延

電話東京(252)4304

【昭和39年度会計報告】

(昭和39年4月1日～昭和40年3月31日)

・収入	
前年度より繰越高	40,508円
会費	147,250
会誌売上	14,950
会誌広告料	62,500
討論会要旨売上	12,500
討論会懇親会費	21,500
討論会展示費	25,000
振替貯金利息	2,053
郵便貯金利息	1,809
合計	328,070円

・支出	
通信費(会費発送費を含む)	29,920円
文具費	1,860
第6回討論会	69,360
交通費	5,300
アルバイト料	8,000
40年度繰越金	213,630
合計	328,070円

【昭和40年度中間報告】

(昭和40年8月31日現在)

・収入	
前年度より繰越金	213,630円
会費	195,000
賛助会費	105,000
会誌広告料	28,000
雑収入	16,790
合計	579,810円

・支出	
通信費	5,911円
会誌11～12製作費	200,000
アルバイト料	6,400
文具費	1,425

交通費	1,000
会費過納分返済	1,200
編集委員会渡し	10,000
合計	225,936円

・差引残高 **353,874円**
(庶務会計 小林)

【おしらせ】

第7回土壌物理研究討論会

さきに、第7回シンポジウム開催について、会員各位のアンケートをいたし、その解答は31通に及びました。アンケートの結果は、本部原案を可とするものが多く、在京評議員、幹事参集のもとで検討し、下記の通り開催することに決定いたしました。

記

テーマ 「農業機械と土壌の物理性」

1 土壌のティルス

講師 常松 栄 (北海道大学農学部)
" 鎌田 嘉孝 (長野県農試)

2 走行能

講師 金須 正幸 (農業機械化研究所)
" 佐藤 勝之郎 (三菱重工株式会社)

3 土壌水分と硬さ

講師 竹中 肇 (東大農学部)
" 横井 肇 (農業技術研究所)

日時 昭和40年11月17日(水) 9:30～17:00

場所 東京農業大学

【編集後記】

本号が「農業機械と土壌の物理性」をテーマとする第7回土壌物理研究討論会のための資料の一助になればと思います。次号は、第7回討論会后発行の予定でその特集号です。

また、本会の活動についての御意見、感想などを事務局へお寄せ下さい。(編集幹事 安富、中野、寺沢)

土壤の物理性 第13号

(会 員 配 布)

1965年9月27日 発行

発 行 **土 壤 物 理 研 究 会**

世田谷区千歳局区内世田谷4の461

東京農業大学農業機械研究室内

電話東京(420)2131—内線38

振替口座 東京 17,794

印 刷 弘 進 社

東京都世田谷区世田谷1の16

電 話 (420) 7 8 1 1 番