

Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan

土 壌 の 物 理 性

第 27 号

昭和47年11月

卷 頭 言.....	宇 野 要 次... 1
クローンの摩擦法則について.....	林 尚 孝... 3
確率・システムと毛管水分分布曲線.....	田 淵 俊 雄... 8
水質と土壌の透水性.....	宮本征一・長堀金造...10
地下水現象への土壌物理学的接近.....	木 村 重 彦...15
マレーシア・ムダかんがい事業における水稲二期作導入と地耐力について.....	八 島 茂 夫...20
土の濡れと撥水性.....	宮 本 征 一...24
砂漠の国クウェートの緑化研究に従事して.....	寺 沢 四 郎...36
土 粒 子.....	水 落 勁 美...39
新刊紹介.....40
会務報告.....41

「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って執筆すること。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・総説＞ 土壌の物理性に主眼をおき、広い視野に立って記述したもの。

＜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り状をつける。報文のみ初刷りは著者校正とし、印刷ずみの原稿は返さない。

発表年月日		受付年月日	
種別	原稿枚数	函表数	函枚、表枚
表題	写真数	別刷	葉
著者名			30部+
所属			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
(担当幹事 久保田徹)

東京都北区西ヶ原（〒114）農業技術研究所
土壌第二科内土壌物理研究会編集委員会

土 壌 物 理 研 究 会

会 長 国 分 欣 一

副 会 長 田 淵 俊 雄

編 集 委 員 会

委 員 長 横 井 肇

委 員 藍 房 和 鎌 田 嘉 孝

多 田 敦 中 野 政 詩

編 集 幹 事 久 保 田 徹 仲 谷 紀 男

巻 頭 言

宇 野 要 次

編集者から巻頭言を書くように頼まれた。これまでいろいろな本や雑誌などに自分の専門の土壌調査・分類に関することを中心に種々雑多なものを書いたことはあるが、未だ巻頭言なるものを書いたことがない。何を書いてよいのかと第1号から見なおしてみたら、巻頭言が初掲載されたのは41年9月の15号である。そこに当時の副会長・美園氏が土壌物理研究会の発展について情熱こもる文章をのせられている。それ以来毎号、会長、副会長、大学教授など土壌物理に関しては御専門の方々、本会に対してまた土壌物理の研究に対して日頃の抱負を述べられている。巻頭言は専門家でない者が書くものでなく、私の雑文は土粒子のページがふさわしいと思ったが、年輩と職務の点から巻頭言にして頂けるのだらうと考えて敢えて書くことにした。

紙の消費量はその国、その土地の文化のバロメーターであるといわれている。しかし最近のおびただしい印刷物攻勢は一種の公害になるのではないかと考えることすらある。官庁でも会社でも情報に関する経費は豊富になっている。おかげで立派なPR誌をはじめ、情報、ニュース、通信、などと名付けられた各種の印刷物が数多く職場に送られてくるが全部に目を通す時間はとうていない。自分の専門に係る学会誌、研究機関の報告、雑誌類はせめてその要約だけでも読むつもりでいても次から次へたまり、ついそのまま戸棚行きになるのが多い。特に年度変りの時期には年度成績集をはじめ各種の報告書が各試験場から一斉に職場に送られてきて机の上一杯になる。各研究者が一年間大変な努力をされた研究成果であるので、職責の上からも読む義務が私に課せられていると知りながら、生来の不勉強のため多くのものはそのまま戸棚行きとなり誠に申し訳なく思っている。このように各種の印刷物が氾濫する原因の一つは執筆者側にもあると思う。私は西ヶ原に入った当時塩入先生から農業というものは自然の力に影響を受けることが極めて大きい。それ故どんなによく設計し、且正確に試験した結果であっても唯一度の試験だけで発表してはいけない。repeat 3回これは農業に関する試験研究では絶対必要であるとよく教えられた。今日では自然制御の装置も発達し、また推計学などの進歩も著しいので、先生のお言葉がそのまま今日も通用するとはかぎらないが、研究者にとっては覚えておくべき言葉だと思う。

次に分割発表を考えてほしい。営業誌なら商売上、分割掲載をやることが多いが、学会誌などは出来れば分割せずに掲載すべきでなかろうか。研究者が一日でも早く研究成果を発表し、その研究に関するpriorityをつかみたい気持もよくわかるし、また大テーマのため副題がつけてある場合のことも知っている。しかし分割発表は一般的に読者のことを考えて執筆されていることが少ないと思う。

そこで本誌について一言ふれると、発行が年2回であることは、次の号のくるまでにはゆっくり読め

て大変有難い。無理して多くする必要はないと思う。しかもその中の一冊はシンポジウムを中心とした特集号になっているので、それに関する調べものをする場合、各分野におけるその面の研究成果を互に関連させて知ることが出来るので利用価値は大きい。この方針はシンポジウムに出席出来ない会員のためにも続けられることを望む。次に本誌ではこれまでの26冊を通じて唯一の例外を除いて分割掲載がないことは大変うれしい。この方針も是非続けてほしい。最後に本誌の読者はいろいろな専門分野の人達の中に広がって行くであろうと、山中金次郎初代会長は考えられ、その就任挨拶で本誌に研究成果を発表する際には非常に程度の高い内容を、非常に解り易い様式に表現するよう努力してほしい旨希望されている。代々の編集者がこの線をよく守っておられるため、私のような専門外の者でも何とか解った気持ちになって読める。今後も各分野の人達が容易に理解出来る表現をとるよう努力してほしい。土壌物理は今後ますます重要となる学問であるので、本会の発足当時150余名の会員が今日約800名まで伸びている。今後まだまだ伸展すると思う。どうか時代に甘えることなく、よりよい会誌にされんことを切に望む。

ク ー ロ ン の 摩 擦 法 則 に つ い て

林 尚 孝*

I. ま え が き

土壌の挙動を、粉粒体をモデルとして解明しようとする考え方が¹⁾ある。粉粒体を土壌のモデルとすること自体は問題がなく、複雑な土壌の挙動を明らかにするためのひとつの重要な手段と考えられる。しかし、肝心の粉粒体の挙動が力学的に解明されているのかというと、かならずしもそうではない。学会誌の埋草に「粉体魔物説」という随想さえ見られる現状である²⁾。

粉粒体の物性についてみると、気体や液体において確立されているような指標が皆無に近い。粉粒体の個々の粒子についての、粒形、粒の大きさ、比重などの概念は容易に理解できる（一次物性）。しかし、粒子の集団としての粉粒体の挙動は、一次物性からは類推できない。たとえば粉体の二次物性を示す指標のひとつとして、嵩密度が用いられる。同一の粉体を用いても、一次物性から嵩密度は類推できないし、つめ方によってもそれは大きく変化する。

筆者は、肥料・農薬・穀粒などの粉粒体の流動性について関心をもってきた。粉粒体の流動性についての指標にも適当なものがなかった。そのために、土質力学で用いられていた息角の概念が代用され、古くから粉粒体の二次物性を示す代表的な指標とされてきた。ところが、Train³⁾により息角の寸法効果が指摘されると、息角そのものが指標として適当かどうか疑問となった。筆者は、息角の示す複雑な挙動そのものが粉体物性の複雑さの反映と考え、息角の挙動の解明にとりこんできた結果、一応の結論をえた⁴⁾。

ここでは、息角の研究の過程であきらかにされた低圧領域における摩擦法則の特異性について述べることにする。土のせん断抵抗において用いられるクーロンの式は、固体間摩擦に用いられているクーロンの法則と違った形で表わされる。クーロンの式とよばれるふたつの式についての関係を以下にとりあげた。

II. ふ た つ の ク ー ロ ン の 式

1. 固体表面の摩擦

固体間の摩擦については、経験則としてクーロンの法

則が有名である。この法則を簡条書きにすれば、つぎのようになる⁵⁾。

(1) 摩擦力は摩擦面に働く垂直力に比例し、見かけの接触面積の大小には関係しない。

(2) 摩擦力（動摩擦力）はすべりの速度の大小には関係しない。

(3) 静摩擦力は動摩擦力よりも大きい。

この三つの実験法則は、18世紀の実験物理学者・工学者のクーロン⁶⁾の名をとってクーロンの法則、またはそれより百年前に同様な法則を確認したアモントンの⁷⁾名をとりアモントンの法則、あるいはアモントン・クーロンの法則とよばれている。摩擦力を F 、垂直力を P 、摩擦係数を μ とすれば、次式が成立する。（ μ は定数）

$$F = \mu P \quad (1)$$

固体間の摩擦についてのべられているクーロンの法則を、以後アモントンの法則とよび、(1)式をアモントンの式とよぶことにする。アモントンの式は、著しい高荷重、低荷重においては成立しないといわれ、低荷重領域では(3)式に従うといわれる⁸⁾。

2. 土質力学でのクーロンの式

土質力学では、垂直応力 σ とせん断応力 τ との関係を示す次式を、クーロンの式とよんでいる。

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad (2)$$

ここで、 ϕ は内部摩擦角、 c は粘着力を示し、いずれも定数と考えられている。チェボタリオフ⁹⁾は粘着力のない砂のような粉粒体では、 $c=0$ だから、内部摩擦角 ϕ と息角 α_R は等しいとしている。

(2)式は応力の形で書かれているので、書きかえると(3)式がえられる。

$$F = \mu_1 P + C \quad (3)$$

(3)式は(1)式と同じくクーロンの式とよばれている。曾田は、粘着力 C の意義を確立した点では、(3)式はクーロンよりピンチ(S. Vince)の名を冠すべきであるとしている⁶⁾。混乱をさけるため、曾田の指摘に従い、以後(3)式をピンチの式とよぶことにする。

3. クーロンの式をめぐる混乱

クーロンの式とよばれる二つの式を、アモントンの式とピンチの式に区別してよぶことにした。クーロン自身の示した実験式はピンチの式の形であった。クーロン以

* 茨城大学農学部 (1972.9.7受理)

後の多くの研究成果により、固体摩擦についてはアモントンの式を指してクーロンの法則としている。このため、アモントンの式もピンチの式もともにクーロンの式とよばれ、すくなく混同がおこっている。ピンチの式で $C=0$ のばあいはアモントンの式になる。付着力がない粉体ではアモントンの式が成立することになる。

アモントンの式とピンチの式について検討してみる。ピンチの式の μ_1 とアモントンの式の μ の間には次式が成立する。

$$\mu = \mu_1 + C/P \quad (4)$$

アモントンの式では μ を一定と考えているのに対し、ピンチの式では μ_1 を一定と考えている。(4)式から P が C にくらべてきわめて小さいときには μ は非常に大きくなり、 P が増加するにつれ μ は μ_1 に近づくことになる。すなわち低荷重領域では粘着力 C の影響を重視しなければならない。

粉体現象（たとえば息角）について、ピンチの式とアモントンの式のいずれを適用すればよいのだろうか。息角について、チェボタリオフやテルツァギ・ベックは、付着力のないばあいにはアモントンの式を用いている。

以上のようにアモントンの式とピンチの式をどのようにに区別するのか、成立の範囲はどうか、粘着力・付着力 C をどう考えるべきかという問題はこれまで明確にされていなかった。

III. ガラス平面間の静摩擦実験

1. はじめに

低圧領域における摩擦現象を、ばらつきを伴う表面の

破壊現象と考え、そこでの法則性を明らかにすることを目的とした。アモントンの式あるいはピンチの式にとらわれずに確率論の立場から実験を行なった。この実験は、つぎのような特徴をもつ。

(1) 見かけの圧力範囲は、約 $0.04 \sim 241 \text{g/cm}^2$ である。クーロンのおこなった実験 ($0.08 \sim 50 \text{kg/cm}^2$) より低い圧力領域を含んでいる。

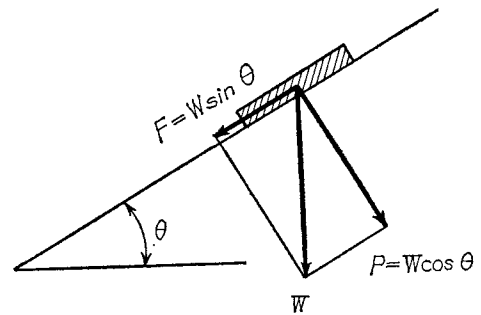
(2) 摩擦の影響を除くため、1回ごとに新しい摩擦面を用いた。

(3) 実験ではばらつきの分布を重視し、平均値だけでなく統計的な取扱いをした。

2. 実験材料および方法

(1) 実験材料 一定の平面性をもつとみられる光学顕微鏡用カバーガラス1号 ($18 \times 18 \times 0.15 \text{mm}$, 約 0.12g) をスライダとし、スライドガラス1号を台とした。

(2) 圧力範囲 底面に薄いゴムをはった鋼製円柱を荷重として用いた。スライダ重量は、当初7種類とし、追実験でさらに3種類を比較した。(表1)スライダ面



図一1 傾斜法による静摩擦係数の測定

表一1 ガラスの静摩擦係数の荷重特性

スライダ重量 W (g)	標 本 数 N_s (回)	平均静摩擦係数 $\bar{\mu}_s$	標 準 偏 差 s	極 値		t 分布による $\bar{\mu}_s$ の 95% 信頼区間
				最 小 値	最 大 値	
0.12	41	0.543	0.1763	0.294	1.139	0.599~0.488
2.92	37	0.387	0.0844	0.272	0.633	0.415~0.359
6.02	42	0.358	0.0882	0.254	0.688	0.385~0.330
11.82	29	0.362	0.0668	0.230	0.530	0.388~0.337
25.82	38	0.361	0.0659	0.239	0.502	0.383~0.339
53.72	26	0.342	0.0530	0.242	0.459	0.363~0.320
100.42	38	0.339	0.0431	0.224	0.441	0.353~0.325
0.12	40	0.558	0.1514	0.269	1.005	0.606~0.510
1.12	41	0.443	0.0854	0.299	0.708	0.471~0.415
781.5	39	0.341	0.0527	0.234	0.431	0.362~0.320

積は一定なので、実験結果は荷重で示す。

(3) 表面清浄法 表面のよごれの状態により $\bar{\mu}_s$ の大きさは著しく変る¹⁰⁾。エーテル・アルコール拭きあげ法を用いて、表面のよごれの状態を一定にするよう努めた。

(4) 実験条件 温度20℃、湿度65%の恒温恒湿室を用いた。

(5) 測定方法と誤差 測定法としては傾斜法 ($\omega = 0.5\text{deg/s}$) を用い、スライダのすべり出す角 θ から $\mu_s = \tan \theta$ として静摩擦係数を求めた。(図1) θ の読取り誤差は $\pm 5'$ であり、 $15'$ 以上のばらつきは実験誤差以外の原因から生ずると考えられる。

(6) 測定順序 荷重について実験順序をランダム化し、荷重以外の要因の影響を防いだ。

3. 実験結果および考察

(1) 実験結果の概要 表-1は、10シリーズ9種類の実験結果をスライダ重量ごとに、 $\bar{\mu}_s$, s , 最小値, 最大値, t 分布による $\bar{\mu}_s$ の95%信頼区間について示したものである。第一表より、 $\bar{\mu}_s$ はスライダ重量により影響されること、いちじるしいばらつきを伴うことが分る。

(2) アモントンの式との比較 アモントンの法則によれば、 $\bar{\mu}_s$ は W に無関係に一定となる。実験結果について、これを確かめてみる。 t 分布による $\bar{\mu}_s$ の95%信頼区間についてみると、 $W = 100.42\text{g}$ で信頼区間の幅はもっとも狭い。 $W = 100.42\text{g}$ での信頼区間の範囲から他の荷重の $\bar{\mu}_s$ をみると、 $W \leq 25.82\text{g}$ で有意差があり、 $53.72 \leq W \leq 781.5\text{g}$ では有意差が認められない。すなわち、アモントンの式は、荷重 25.82g 以下すなわち $8\text{g}/\text{cm}^2$ 以下の圧力範囲で成立しないことがあきらかである。固体間の静摩擦においても、低圧領域ではアモント

ンの式が成立しないことが実験により確かめられた。

(3) $\bar{\mu}_s$ と W との関係について アモントンの式は一定の圧力以上で成立することが確かめられた。一定の圧力以上で急に不連続的にアモントンの式が成立するかどうかは次の問題である。表1で、 W と $\bar{\mu}_s$ の関係を見ると、 W の増加につれ $\bar{\mu}_s$ は単調に減少して一定値に近づく。さらに、 μ_s の標準偏差、極値などについても W の変化に対応した一定の傾向がみられる。

アモントンの式からみれば、低圧領域の摩擦現象は例外であろう。しかし、ばらつきをも含めて W と $\bar{\mu}_s$ の関係をみれば、例外的にみえる低圧領域を含む全圧力領域において一定の法則性が貫いていると考えた方が合理的であろう。

(4) ばらつきの分布形について はじめに正規分布についてみると、結果の一部にはあてはまるが全体としては適用できない。とくに低圧領域で左右の非対称が著しく右にひずむ分布であると認められる。正規分布以外の分布関数として、二項分布、ポアソン分布、対数正規分布、ワイブル分布など多くのものがある。これらの中から数学的な取扱いが簡単で、筆者が息角の研究⁵⁾ に用いて好結果をえたレイリー (Rayleigh) 分布を μ_s のばらつきに応用してみる。レイリー分布の密度関数 $f(\mu_s)$, 分布関数 $F(\mu_s)$, 信頼度関数 $R(\mu_s)$ は、次式であらわされる。

$$f(\mu_s) = \frac{2}{\alpha} (\mu_s - \gamma) \exp\left\{-\frac{(\mu_s - \gamma)^2}{\alpha}\right\} \quad (5)$$

$$F(\mu_s) = 1 - \exp\left\{-\frac{(\mu_s - \gamma)^2}{\alpha}\right\} \quad (6)$$

$$R(\mu_s) = \exp\left\{-\frac{(\mu_s - \gamma)^2}{\alpha}\right\} \quad (7)$$

($\mu_s \geq \gamma$ のとき)

μ_s のばらつきがレイリー分布で近似できるならば、(7)式を変形した(8)式が成立し、 μ_s と $\sqrt{-\ln R(\mu_s)}$ は直

表-2 各荷重における α, γ

スライダ重量 W (g)	α	γ
0.12	0.1448	0.2061
2.92	0.0332	0.2255
6.02	0.0336	0.1891
11.82	0.0208	0.2347
25.82	0.0202	0.2348
53.72	0.0131	0.2402
100.42	0.0086	0.2565

$$\alpha = s^2 / (1 - \pi/4)$$

$$\gamma = \bar{\mu}_s - 1.913s$$

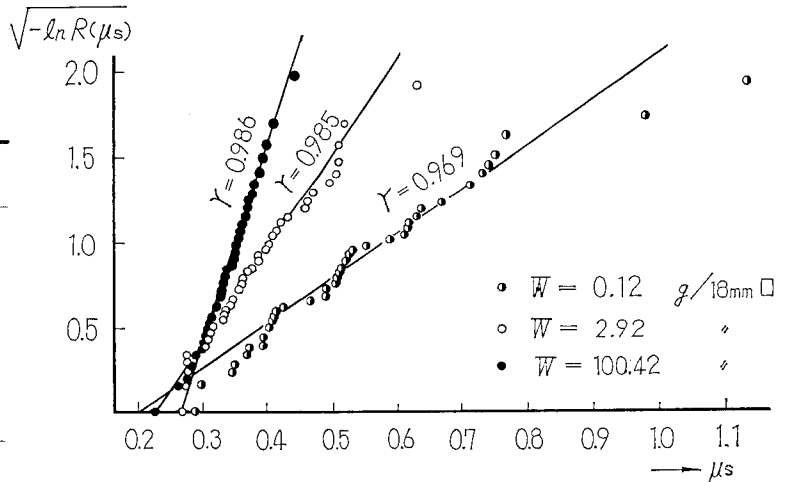


図-2 μ_s と $\sqrt{-\ln R(\mu_s)}$ との関係

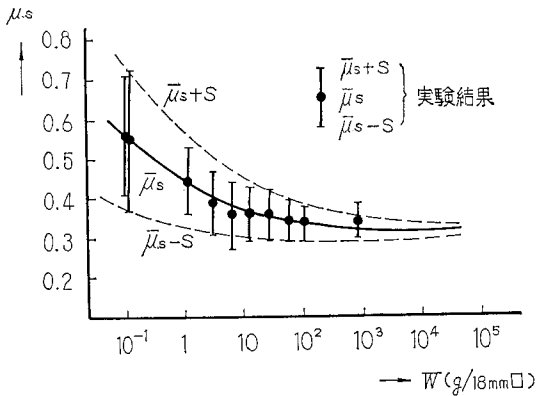


図-3 $\bar{\mu}_s$, $\bar{\mu}_s + s$ と W との関係

線関係をもつ。

$$\sqrt{-\ln R(\mu_s)} = (\mu_s - r) / \sqrt{\alpha} \quad (8)$$

図2は、実験結果のうち $W=0.12, 2.92, 100.42g$ のそれぞれについて μ_s と $\sqrt{-\ln R(\mu_s)}$ の関係を示したもので、ほぼ直線状になっている。最小二乗法で求めた回帰直線との相関係数を図中に示した。相関はきわめて高く、実験結果にレイリー分布をあてはめても不都合はない。

レイリー分布は、2ケのパラメータ α, r により定まる。パラメータ α, r は、①平均値と分散より求める方法、② $\sqrt{-\ln R(\mu_s)}$ と μ_s の回帰直線より求める方法のふたつから求められる。表2に、平均値と分散より求めた α と r を示した。

(5) α, r と W との関係について 一定荷重のもとでの μ_s のばらつきはレイリー分布にしたがい、二つのパラメータ α, r で示された。さらに、 α, r と W との関係が求められれば、この実験条件下での摩擦現象は、ばらつきを含めて完全に表現できる。

W と α の間には、ほぼ次の関係が成立つ。

$$-\log \alpha \doteq \log 15.6 + 0.40 \log W \quad (9)$$

すなわち、

$$1/\alpha \doteq 15.6 W^{2/5} \quad (10)$$

つぎに、 W と r についてみると、 r と $\log W$ との間に次式が成立する。

$$r \doteq 0.219 + 0.015 \log W \quad (11)$$

実験結果から求めた(10)式の α 、(11)式の r から、 μ_s と s を W であらわす。

$$\bar{\mu}_s \doteq 0.219 + 0.015 \log W + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{15.6}} W^{-1/5} \quad (12)$$

$$s \doteq \sqrt{(1-\pi/4)/15.6} W^{-1/5} \quad (13)$$

(12)式は、 $W \rightarrow \infty$ で $\bar{\mu}_s \rightarrow \infty$ 、 $W \rightarrow 0$ のとき $\bar{\mu}_s \rightarrow -\infty$ となるので、一定の範囲で成立する。(12)、(13)式から $\bar{\mu}_s$ 、 $\bar{\mu}_s \pm s$ を求め、 $10^{-1} \leq W \leq 10^5 g$ の範囲で、実験結果とあわせて図3に示した。

(6) ビンチの式との比較 図3からはビンチの式が成立しそうである。しかし、 $\bar{\mu}_s$ は(12)式によって示されるので、(4)式のビンチの式とは一致しない。おそらく、ビンチの式はより狭い領域で成立する近似式と考えてよいであろう。

IV. むすび

粉粒体を土壌のモデルとするばあいに大きな問題となるのは、粒子間にはたらく摩擦の法則に不明な点があることである。固体間の摩擦に用いられるクーロンの法則と土質力学で用いられるクーロンの法則との関係を明らかにするために、ガラス平面間の静摩擦係数についての実験を行なった。

(1) 固体間摩擦においても低圧領域(本実験では $8 g/cm^2$ 以下)ではアモントンの式は成立しない。

(2) 低圧領域では、静摩擦係数はいちじるしいばらつきを示す。一定荷重下でのそれはレイリー分布にしたがう。

(3) 低圧領域を含めた広い領域で、これまではビンチの式が成立すると考えられていた。しかし、固体間摩擦ではビンチの式は必ずしも成立するとはいえない。

(4) 実験は、比較的きれいな表面についておこなわれ、付着力の影響は考えなくてよい。息角は粉体表面で、粉体の自重によって形成されるので、低圧領域における摩擦現象のひとつと考えてよい。アモントンの式は付着力のないばあいでも低圧領域では成立しない。したがって、チェボタリオフ⁹⁾ やテルツァギ・ベック¹¹⁾ のように乾いた砂の息角現象にアモントンの式をあてはめて考えることは誤りといえる。

(5) 粉体の挙動には、確率的な現象が多くみられる。粉体の挙動の多くには摩擦が介在する。表1に示したように、低圧領域での摩擦現象はとくに大きなばらつきを伴う。粉体の挙動は、このような領域で生じているため、確率的な現象となるのであろう。

(6) 以上の議論は、付着力のない状態で簡単なモデル実験によってえられた結果である。しかし、低圧領域での摩擦は意外に複雑な挙動を示している。粘着力のあるばあいで摩擦現象が明確にされない限り、粉体を土壌のモデルとすることの有効性は少ないであろう。

引用文献

- 1) ソコロフスキー：“土のような粒状体の力学”，オーム社，(1964)
- 2) 最上武雄：粉体工学，Vol.1, No.5, 293, (1964)
- 3) Y.R.A.：化学工学，Vol.24, No.8, 600, (1960)
- 4) Train, D.：J. of Pharmacy & Pharmacology, Vol. 10, 127T, (1958)

- 5) 林 尚孝 : 材料, Vol.21, No.213, 754, (1971)
- 6) 曾田範宗 : “摩擦の話”, 岩波新書, (1971)
- 7) Coulomb, C. A. : *Memoires des Mathématique et de Physique de l' Academie Royale des Sciences*, 104, (1785)
- 8) Amontons, G. : *Historie de l' Académie Royale des Science avec les Memoires de Mathématique et de Physique*, 206, (1699)
- 9) Tschebotarioff, G. P. : “*Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures*”, McGraw-Hill, 125, (1951)
- 10) 木下是雄, 牧二郎 : 応用物理, Vol. 18, No. 8-9, 260, (1949)
- 11) Terzaghi, K. & Peck, R. B. : “*Soil Mechanics in Engireering Practice*”, 81, 92, John Wiley & Sons., (1948)

確率・システムと毛管水分分布曲線

田 淵 俊 雄*

最近、あらゆる分野でシステムという言葉がもてはやされている。それだけ物事を総合的に、システム的に認識することが重要視されるようになってきたのである。筆者が毛管水分分布曲線 (C. M. D. C) と粒子層の間ゲキシステムとの関係を研究し始めた1960年代の初期には、システムと名のつく本はほとんど見当らなかったことを考えると大変な変わりようである。

土粒子の間に構成される間ゲキの世界、大きさが異なり、かつ複雑無限につながっている間ゲキのルート。これらと CMDC との関係を明らかにすることは土壌物理の研究者にとって重要で魅力的な課題であった。

筆者はこの間ゲキのマイクロの世界をなるべくそのままに用いてマクロの世界と結びつけたいと思った。間ゲキの不均一性を Childs にならって分布関数で表し、複雑な間ゲキの連結を充填モデルのシステムで表現した。したがって現象は確率で規定され、確率的システムの問題となった。ところが間ゲキセルの連結の無限性は計算を膨大にし、一時は研究を中断せざるをえなかった。しかし電算機の急速な普及によって助けられ、1966年に Soil Science に第一報を掲載することができたのである。

このような確率システムの簡単な例としてはクサリの破壊がよく引用される。クサリに重さ W の物体をつり上げると、ある一つの輪が W の重さによって切れる確率は W の関数となり $f_1(W)$ で表わされる。輪が100gの重さで切れる確率が50%であれば $f_1(100)=0.5$ である。

次に二つの輪がたてにつながっているクサリの切れる確率 F を求めよう。 F は次の三つのケースの確率の和である。(1) 2個の輪が両方切れる確率 $f_1 \times f_2$ (2) 1番目の輪が切れ、2番目の輪が切れない確率 $f_1 \times (1-f_2)$ (3) 1番目の輪が切れないで2番目の輪が切れる確率 $(1-f_1) \times f_2$ したがって

$$F = f_1 f_2 + f_1 (1-f_2) + (1-f_1) f_2 \quad (1)$$

または、2個の輪が両方とも切れない確率 $(1-f_1) \times (1-f_2)$ を求め、1から引いてもよい。

$$F = 1 - (1-f_1) (1-f_2) \quad (2)$$

(1)と(2)式は同じ値である。

輪が N 個ある場合には

$$F = 1 - \prod_i^N (1-f_i) \quad (3)$$

一個一個の輪の f が等しければ

$$F = 1 - (1-f)^N \quad (4)$$

これが輪を直列に一つつなげた場合の式で、マイクロなエレメント (輪) のもつ確率 f とマクロな強度 F との関係を示す。輪のつなげ方を変えれば色々な $F(f)$ 式がえられる。

土の場合にはどうなるであろうか。クサリの輪は土粒子に囲まれた間ゲキセルである。飽水層から排水した時の CMDC の場合には土の中の間ゲキセルから水が除去されること、またはセルに空気が入ることが輪の切断に相当し、重さ W は吸引圧 h に、確率 f はセルとセルの間ネックをメニスカスが通過する確率、 N はセル層数におのおの相当する。

f はネックの大きさ d の分布関数 $f(d)$ と d と毛管圧 h の関係 $h(d)$ とから求められる。筆者の求めた式を紹介すると

$$f(d) = \frac{A}{d} \phi + 1 - 6.45A \quad (5)$$

ϕ : 粒径 cm

A : 分布定数で0.2となる。

これを0.2/ d 型分布と命名した。

$$h(d) = \frac{C}{d} \quad (6)$$

C : 毛管係数で0.24。

(6)を(5)へ代入して

$$f(h) = \frac{A}{C} \phi h + 1 - 6.45A \quad (7)$$

$A=0.2$, $C=0.24$ とすると

$$f = 0.83\phi h - 0.29 \quad (8)$$

$F(f)$ はクサリの例よりは複雑になる。それはタテ方向だけでなく横方向にもセルがつながっているからである。粒子層と大気の接している面から数えて第一番目のセルへの空気の侵入確率 (または水が除去される確率) F_1 を求めてみる。このセルへの空気侵入として第一に考えられるのは大気からの直接侵入ルートである。第二

は隣りのセルへ一度侵入した後に侵入する間接ルート。さらにもう一つ離れたセルからやってくるルート。そしてそのまた向こうのセルから……。こうして無限に近い空気侵入ルートが考えられる。これらの侵入確率は f, f^2, f^3, \dots, f^m となる。そして隣接セルの数は複数であるから、それらの確率はその数を乗じたものになる。たとえば立方充填では4個のセルに隣接しているから4倍の確率になる。こうして各ルートからの侵入確率が求められるが、 F_1 はこれらの確率の和(確率的な)である。

次に大気面から2番目のセルへの侵入確率 F_2 を F_1 をベースにして計算していく。こうして大気面から n 層目に当るセルへの空気侵入確率 F_n を求める。この時、 F は漸化式の形になり、 f ばかりでなく空気侵入方向の層数 n と横方向の層数 m の関数になる。しかし、 n と m を大きくすると(土では n と m は無限大に近い) F は収斂するので、結局 f だけの関数になる。

この立方充填型の収斂値を近似的に表わしたのが(9)式である。

$$F(f) = 1 - \exp\left[-\frac{f - 0.255}{0.082}\right] \quad (9)$$

(9)式に(8)式を代入すると

$$F(h) = 1 - \exp[-10.2\phi h + 6.65] \quad (10)$$

セルに水が残る確率は $1 - F$ になる。そしてセルの数が無限大であるから、この確率 $1 - F$ が水が残っているセルの数を表わすと考えてよい。残水しているセルの数の割合を θ で示すと

$$\theta = 1 - F \quad (11)$$

$$= \exp[-10.2\phi h + 6.65] \quad (12)$$

体積含水率 V_w は

$$V_w = W_0 + (V_v - W_0) \times \theta \quad (13)$$

W_0 : 最小含水量

(12)式は $0.2/d$ 型分布のネックをもつ立方充填型の CMDC の式になるが、この式から $\theta = 95\%$, $\theta = 5\%$ に相当する毛管高 h を求めると

$$h(95\%) = 0.66/\phi \quad (14)$$

$$h(5\%) = 0.95/\phi \quad (15)$$

粒径 1mm では $h(5\%)$ は 9.5cm , 0.5mm では 19cm , 0.2mm では 48cm となる。

また(12)式を変形すると

$$\ln \theta = -10.2\phi h + 6.65 \quad (16)$$

したがって $\ln \theta$ と h は直線関係になる。

粒径のそろったガラス粒や砂についての実験データで $\ln \theta$ と h の関係に直してグラフにプロットしてみるとかなり良い一致がみられる。ということはこれらの試料が立方充填型に近いことを意味している。

今回は触れなかったが、“確率を粒体に適用した事例”はこの他にも非常に多くなってきている。CMDC ばかり

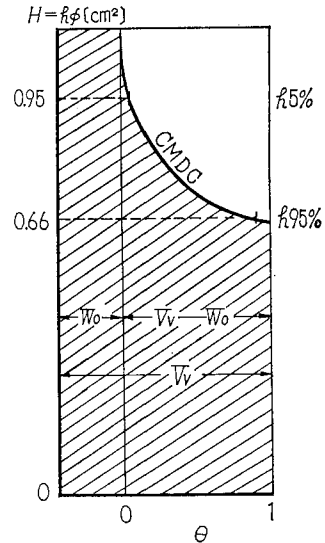


図-1

でなく、透水係数、拡散、浸透、粒度、混合、応力伝達等々、土壌物理の多くの分野で活用されてきている(文献5~12)。これは不均一な性質をもつ土の研究にとって必然的ともいえることである。さらにシステム手法の導入もマイクロとマクロの両方の側面をもつ土の研究においては当然のことといえよう。今後の発展を期待したい。

参考文献

- 1) Tabuchi, T: Theory of suction drain from the saturated ideal soil, Soil Sci. 102(2) (1966)
- 2) Tabuchi, T: Experiment on suction drain from an ideal soil, Soil Sci, 102(5) (1966)
- 3) Tabuchi, T: Theory of suction drain from the saturated ideal soil(2), Soil Sci 112(6) (1971)
- 4) 田淵俊雄: 粒子層における浸潤と毛管力, 研究の資料と記録(東大農地工学研究室) No.19, (1971)
- 5) Childs, E. C. et al: The permeability of porous materials, Proc. Roy. Soc. 201A(1950)
- 6) Mogami, T: A stastical approach to the mechanics of granular materials, 土質工学会英文誌 5 (2) (1965)
- 7) Mogami, T: Mechanics of granular material composed of particles of various sizes, Trans. JSCE 137, (1967)
- 8) 長尾高明: 粉体静力学の研究, 日本機械学会論文集(2部) 34, (1967)
- 9) 吉沢昭宣: ランダムフロックの構造の模擬, 粉体工学研究会誌 7(3) (1970)
- 10) 中野政詩: 土の水分量と毛管張力の関係, 農土論集35, (1971)
- 11) 武内 等: 確率モデルによる多孔体内の流れのシミュレーション, 土木学会論文集187, (1971)
- 12) 増田弘昭: 粒度分布による実験値のバラツキに関する考察, 粉体工学研究会誌 8(3), (1971)

水質と土壌の透水性

宮本 征一*・長堀 金造**

まえがき

水質、特に水中の陽イオンが、土壌の透水性に影響することは、古くから知られていたことである。この現象は、乾燥地のカンガイ等にたずさわる場合、極めて重要な意味を持つ。何故なら、乾燥地のカンガイ水は、大なり小なり塩分を含んでおり、透水性の低下、排水不良は、通常土中への塩の集積、作物への塩害という道をたどる。メソポタミア文明の崩壊の原因が、カンガイによる透水性の減退と塩の集積によるとする説は、この極端な例であろう。

降水、淡水に比較的恵まれている我が国においては、この現象の実用的意味は余りかえりみられていない。近年の干拓地の畑作利用、汚水、海水のカンガイ利用、あるいはまた海外技術援助などに際しては一考すべき問題と思われる。本報は、特に水の化学的性質と土の透水性との関係に関する近年の研究成果をとりまとめて解説したものである。その他の水質、例えば水中の微生物、微粒子、有機物、等の影響については、未だ総括する程の業績は蓄積されていないと思われたので、若干の参考文献(1, 2, 12, 22)をかかげるにとどめたい。

I. 水質の影響を説明する諸説

土壌の透水性を表わす指標として、透水係数を K (Hydraulic conductivity) 又は k として (permeability) 用いることは、周知の通りであろう。透水係数 k は、一般に用いた液体の性質にかかわらず、土の性質(有孔間隙の大きさと分布)と、液体の含有量だけによって定まる定数とされている。(つまり、液体と土壌との相互作用はない。) この考え方は、砂やガラス玉のように構造の安定した粉体においてはヒステレンス、及び封入空気の影響を無視すれば、実用上妥当と考えることができる。

土壌においては、一般に k は用いた液体の化学的性質によって影響を受ける。これを説明する次のような諸説がある。i] 実験誤差, ii] 浸透圧勾配の影響, iii] 電気二重層のシービング (Sieving) の影響, iv] 土粒子分散

の影響, v] 土粒子の膨潤の影響, vi] その他。

実験誤差だとする考え方は、 k に関する限り無視できない。周知のように、 k は微生物の活動¹⁾、封入空気²⁾、亀裂、測定時間、等の多くの要因によって、著しく影響を受けるので、水質と k の関係を論じる場合、これらの要因を消去又は等しくする必要がある。不幸にして、多くの実験データには、これらの要因が混在しており、実験誤差としてかたづけられる場合が少くない。

浸透圧勾配が、水の流れに影響するであろうという論議は、熱力学概念が土壌水に導入された頃盛んに行なわれたが、近年 Letey and Kemper¹⁶⁾ によって、水が主に液体として移動する範囲においては、実用上無視できることが実験的に示されている。(水分平衡にある土柱の一端に塩をまいた場合、急激な浸透圧勾配が形成されるが、水はほとんど移動しない事実を想像すれば容易に理解されよう。土中での液体の移動は、機械的な圧力勾配によるのであって浸透圧勾配によるものは無視できる。)

土粒子の表面に形成される電気二重層が、水膜の移動に対して、あたかもシープするような型で抵抗することは、理論的にかなり良く解明されている。(例えば Kemper¹⁴⁾)、又水の化学性がこの二重層に影響することも良く知られている。(例えば Bolt and Miller⁴⁾)、従って、水質が変化した場合、 k は電気二重層の変化を通して影響を受けると考えることができる。この影響を Kemper の理論式¹⁴⁾ から概算すると、土粒子表面積の大きな土で、水分が極めて少ない場合、相当に大きなものとなるが、我々が通常問題としている水分の多い領域では、実用上無視できることが解る。(水分の多い領域では、みかけ上の水膜の厚さは、電気二重層の厚さの変化に比べ非常に大きい。)

分散した土粒子からなる土の透水性は、団粒化した場合に比べ、一般に小さいことは良く知られている。又水質が土粒子の分散、凝集に関与することは、サスペンションの安定性の実験等で良く示されることである。水質の変化が、この機構を経て、自然の状態の土の k にどれ程影響するかは、未だ十分には検討されていない。限られたデータから推定する所、機械的外力を加えない状態では、影響は比較的少ないようである。勿論、団粒を保

* Dept of Soil, Water and Engineering, Univ. of Arizona

** 岡山大学農学部 [1972.6.22.受理]

っている結合物質を溶解するような物質が水中に存在する場合は別問題である。

土粒子の膨潤作用の影響とする説は、現在の所、最も実践的である。すなわち、モンモリロナイト、バミューキュライトのような膨潤可能な粘土鉱物は、塩分濃度が低い時に、一価イオン、特に Na^+ によって膨潤し、水の流れに有効な土中の間隙を縮小させ、透水性を減退せしめる、とする説である。この仮説をうらずける報文は数多く、中でも Mcneal, Norvell and Coleman¹⁶⁾ の報文は、モンモリロナイトの膨潤量と k の間に、密接な関係があることを明確に示している。

II. 透水性変化の特性化と水質基準

透水性の変化が、粘土鉱物の膨潤による説に従えば、これを特性化しようとする場合、膨潤性粘土の相対量と、これの膨潤に影響する水質の要因に的をしぼって考えることができる。

(1) 溶解総塩分濃度 (TDS) とその一価、二価陽イオンの相対性 カンガイ水中の溶解総塩分濃度は TDS (total dissolved Salt) 一価陽イオンの二価イオンに対する相対性は Na^+ に注目して SAR (Sodium Adsorption Ratio) 土粒子表面の交換性 Na^+ に注目して、他の交換性陽イオンに対する相対性を表わすのに ESP (Exchangeable Sodium percent) なる指標が用いられる。

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})/2}} \quad (1)$$

$$\text{ESP} = \frac{\text{NaX}}{\text{CEC}} \times 100 \quad (2)$$

ここに Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} は各々のイオンのカンガイ水中における活量濃度 (meq/l), NaX は交換性ナトリウムの相対量 (meq/100gr 乾土), C.E.C. は陽イオン交換容量 (meq/100gr 乾土) である。他の陽イオン、例えば K^+ , NH_4^+ , H^+ , などに注目した場合、類似の表現が使われるが、通常のカンガイ水には、前述の陽イオンがほとんど占めるので、一般に余り必要ではない。

粘土鉱物の膨潤は、TDS の減少、ESP の増加につれて、大きくなる¹⁸⁾ことは良く知られている。しかし ESP の測定は、はんざつな上に土によって異なる。もし ESP と SAR の関係が明らかになれば、膨潤及び k の変化を、カンガイ水測の指標で特性化できることになる。Gupon のイオン交換式から、ESP と SAR の比は、一定になることが予想されその定数は、実験的に土の種類にかかわらずほぼ 1.0 になることが報告されている⁶⁾²³⁾²⁷⁾。(例外については後述)

TDS, SAR を変えて、モンモリロナイト系の土で K を求めた Mcneal and Coleman¹⁷⁾ の実験データの一部を図-1 に引用している。

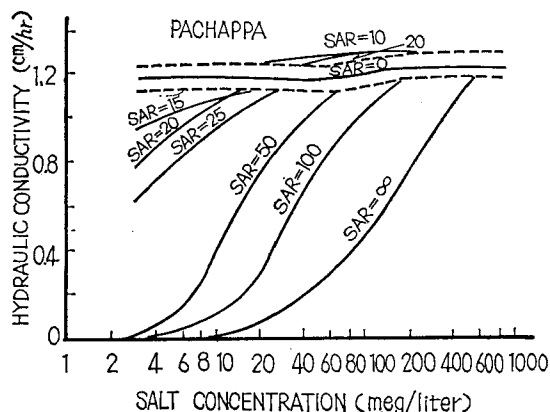


図-1 TDS, SAR が透水係数 K に及ぼす影響
点線は SAR=0 における実験誤差の範囲を示す。
(McNeal and Coleman¹⁷⁾ による)

図から明らかなように、 K は TDS の減少、SAR の増加に伴って減少している。用いられた試料は米国西部の乾燥地の典型的なものであるから、この減少の大きさは、おおまかな目安となろう。

この現象を数量的に表現できれば、技術者にとっては好都合である。この一つの試みとして McNeal²⁰⁾ は、上記の実験データ及び膨潤量を推定する理論式²¹⁾をもとに、次のような式を提案している。

$$1 - KR = \alpha x^\beta / (1 + \alpha x^\beta) \quad (3)$$

$$x = (\text{fmont}) (3.6 \times 10^{-4}) [\text{SAR} - (1.24 + 11.63 \log C)] (356.4C^{-1/2} + 1.2)$$

ここに KR は相対透水係数 ($x=0$ の時の K の値との比として表わされたもので $KR \leq 1$), α , β は実験定数, x は膨潤量で、モンモリロナイトの乾土に対する重量比 (fmont), TDS (C meq/l) 及び SAR だけの関数として与えられる。膨潤説が正しい場合、 α , β は土の種類によらず大体一致した値が期待できるはずである。事実、実験データから SAR だけの関数であることが見出されている。SAR < 25 の時、 $\alpha=25$, $\beta=1$, 25 < SAR < 50, $\alpha=1,000$, $\beta=2$, SAR > 50, $\alpha=45,000$, $\beta=3$ 。

現在まで、上式の妥当性を検討した実験データは少なく、今後の検討が必要と思われる。膨潤説をある程度数量化したという意味で非常に興味深い。

バミューキュライトを主粘土鉱物とする土壌の分布は、モンモリロナイト系に比べ一般に少ないが、CEC が大きく膨潤性を有するものとして良く知られている。Rhoades and lngvalson²⁶⁾ がバミューキュライト系の土で、膨潤量及び K を測定した実験によれば、モンモリロナイト系に比べその変化は少ないことが示されている。例えば、明確な K の減少は、モンモリロナイト系では SAR=15, TDS=50meq/l あたりから始まるが、バミューキュライト系では、SAR=30~60, TDS=20meq/l あ

たりから始まっている。又モンモリロナイト系で K^+ を用いて水分の拡散度を測定したデータによれば、 Na^+ の場合に比べ同一濃度において、非常に大きな値を与えている。このようなデータから判断する限り、 K の変化はモンモリロナイト- Na^+ 系において最も著しいと考えることができる。

(2) バイカーボネイト (HCO_3^-) バイカーボネイトは、水中の Ca^{++} または Mg^{++} と反応し、 $Ca(HCO_3)_2$ あるいは $CaCO_3$ として沈澱することは良く知られている。結果として Na^+ の相対的活量濃度が高くなり、SAR, ESP が増加する。この問題は、初期の Eaton⁹⁾, Wilcox and Blair²⁸⁾ の研究に続いて Langelier¹⁵⁾ の理論式を用いて Bower 等⁵⁾⁶⁾ によって、実用的な型にまとめられた。

$$SAR = SAR_0(1+I)$$

$$I = pH - [(pK_1 - pK_2) + p(Ca^{++} + Mg^{++}) + p(Alk)]$$

ここに SAR_0 はバイカーボネイトを含むカンガイ水で実測される SAR (新しく定義された SAR は、計算によってバイカーボネイトの影響を補正したものである。) I は飽和指数 (Saturation Index) と呼ばれるもので、正の値は、沈澱、負の値は、溶解を表わす。pH はカンガイ水の pH で通常 $CaCO_3$ 又は $Ca(HCO_3)_2$ を含む系では、8.4程度、 pK_1 は H_2CO_3 の分離定数、 pK_2 は $CaCO_3$ の活量積で、両者の差は TDS の関数として、表-1のごとくなる。 $p(Ca^{++} + Mg^{++})$ は各陽イオンのモル濃度の和の負の対数、 $p(Alk)$ は滴定によって測定される CO_3^{--} と HCO_3^- の当量濃度の負の対数である。

表-1 $pK_1 - pK_2$ の値*

TDS (meq/l)	$pK_1 - pK_2$		
1	2.04	12	2.43
2	2.11	24	2.64
4	2.20	36	2.80
8	2.33	54	3.00

* Bower and Maasland⁵⁾ による

Bower Ogata and tucker⁶⁾ が ESP の指標を用いて、上式の妥当性を検討したデータによれば、計算にて求められる ESP (上式の SAR と等しい) と実測値は、良好な一致を示している。同様な実験的検討は、Pratt and Bair²³⁾ によってもなされ、pH=8.6以下で上式は妥当であることが報告されている。(pH=8.6以上になると Na^+ まで HCl_3^- と反応し沈澱を始める。) もちろん、上式はゼオライトのように Na^+ をゆるく保持している鉱物を含んでいる土には、適用できない。

(3) 濃縮と希薄 SAR は(1)式に示されるように、濃縮、希薄によっても変る。従って当然 ESP も変る。この現象は、一価、二価陽イオンが混在するイオン交換系における電子価効果 (Valence effect) と呼ばれるもので、濃縮に伴って NaX が増加し、逆に希薄に伴って NaX が減少する。今濃度が n 倍になったとすれば、SAR は本来の SAR を SAR_0 とすれば

$$SAR = \sqrt{n} SAR_0 \quad (4)$$

のごとく変化する。通常の作物カンガイにおいて、カンガイ水は土中に浸入した後、蒸発散の為に濃縮され、TDS, SAR を増加する。 K に及ぼす影響は、相互に補正し合うことになるので、実用上、大差はないと思われるが、カンガイ水の SAR と土中の SAR は、濃度変化によっても異なることは明確にしておくべきである。

以上は、透水性変化に及ぼす水の化学的要因を、主要なものに限ってとりまとめてみたものである。逆の見方をするならば、この特性化は、透水性管理の立場から、化学的水質基準の目安を与えるものと考えられる。従来まで農業用水の質を論じる場合、作物への直接の影響という側面だけから、基準を設定したきらいがある。水耕栽培、あるいは露耕栽培を目的とするならばそれでよいとして、一般のカンガイ農業においては特に透水への影響を加味することが必要と思われる。現在まで、この面に対するまとまった見解はみあたらないので、以下、透水性の側面から水質基準を設定、あるいは解釈するのに必要な基本的事項を指摘してみると、

a) 水の化学的性質だけでなく、透水に影響する他の水質、例えば、水中の微粒子、有機物、等の指標を発展させる必要がある。

b) 水質の級づけは、土側の性質を加味しない限り不十分である。この意味では McNeal らによってとられた研究指向は貴重であり、現段階では、土側の指標として、モンモリロナイトの含有量及び膨潤がない状態での K の値が適当と思われる。

c) 更に水質の級づけに当っては、土側、水側の質の管理、改良の容易さを加味する必要がある。この面に關する代表的な方法を次項にて紹介したい。

III. 透水性コントロールの為の水質の管理と改良

与えられた土壌の透水性を、水質の立場からコントロールするという事は、基本的に与えられた用水の TDS, SAR を人為的に変えることを意味する。透水性を低下させたい場合 (例えば水田の漏水防止等) については、本報ではふれない。ただ、明確にしておかなければならないことは、TDS, SAR を変化させて、透水性の向上をねらう場合、限界があるということである。何故なら

前述したように、これらは基本的に土粒子の膨潤に関与するものであって、膨潤性のない土、あるいは、膨潤がゼロになった段階以上の所で TDS を増加、又は SAR を低下させても、透水性の向上は望めない。従って、これ以上の透水を必要とするような場合、他の方法、例えば団粒化、等の方法によらねばならない。

(1) 物理的方法 余り適当な表現ではないが水質を化学的、生物的に変えることなく、濃度調整、又は配合のみで、透水性減退防止、あるいは向上をねらう方法である。代表的なものとしては、透水性の悪い Sodic Soil のリーチングに用いられる High-salt-water dilution 法であろう。前項で述べたように、透水性の低下を防ぐ、あるいは向上をねらうには、高い TDS、低い SAR を保持する必要がある。(1)式の表現を使うなら、 x をゼロにするために $SAR \leq 1.24 + 11.62 \log C$ の条件を保つ。)もし最初から淡水を用いてリーチングを行なうと、このような土においては、低い TDS、高い SAR という悪条件が重なって透水はほとんど期待できず、リーチングは実際上時間的に不可能となる。もし高塩度水が入手できる場合、これを最初に流し漸次淡水で薄めてゆけば、(5)式で表わされるように SAR が増加し、急激な透水性低下をきたすことなくリーチングを行なうことができる。この方法によれば、リーチングに要する時間を非常に短縮でき、かつ塩水中の二価陽イオンを交換用のイオンとして利用できる利点があるが、用いる水量(塩水が加わる)が大きくなるので、このような水の排水が許されることが前提となる。勿論二価陽イオンを多く含む塩水が入手できる場合この限りでなく、通常のカンガイ水へ二価イオンの補給水として用いることができる。我が国の干拓地の改良に一考する価値があると思われる。更に詳しい設計等については文献(8, 24, 25)を参照されたい。

(2) 化学的方法 ESP を変えるために Ca^{++} を含む化合物、または土中の $CaCO_3$ を溶解して Ca^{++} を生じさせる物質を直接投入する場合と、SAR を低下させるためにカンガイ水に投入する場合に大別できる。前者の方法については、すでにまとまった解説(参考文献(27))があるので、本報では省略する。

後者の方法は、理論的には古くから可能だといわれながら、現在まで余り実用化されていない。 Ca^{++} を直接カンガイ水に補給する物質として、 $CaCl_2$ 、 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 、 $Ca(NO_3)_2$ 、等が一般に提唱されているが、 $CaCl_2$ はかなり高価であること、 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ はカンガイ水の pH がかなり低くない限り、溶解度が少ない、等の問題がある。

近年特に注目をあびているものは、イオウ化合物の利

用である。特に硫酸は安価に生産され、あるいは工場排液、排気ガスを処理した時の副産物として出て来る為、非常に安価に入手できる。硫酸の一つの利用としては、バイカーボネイトを多く含むカンガイ水の改良が考えられる。すなわち、このような水に硫酸を投入した場合 $H_2SO_4 + 2HCO_3^- \rightleftharpoons SO_4^{--} + 2CO_2(\uparrow) + H_2O$ なる反応が期待できるので、前項で述べたバイカーボネイトによる SAR の増加を防ぐことができる。この場合、pH の低下が予想されるが、 HCO_3^- を 90% 程度反応させた時点では、pH=5、程度となり実用上の防げになるとは思われない。現在この実用化については、アリゾナ州の銅の精錬所から出る渾大な硫酸の利用の一部として研究中である。現時点での見通しは、急速な透水性向上というよりも、流域全体の Alkalization (Na^+ の蓄積)を防止するのに有効と見なされている。

より濃度の高い硫酸水の利用も考えられる。例えば、石灰岩地帯の井戸への透水を良くするために Acidification という手段がとられるのはこの一例である。原理は単純なもので石灰石 ($CaCO_3$) と硫酸を反応させ、有効間隙を拡大させるというやり方である。水質の立場から見た場合、このような処理は井戸水へ Ca^{++} を補給し、SAR を低下せしめるという意味で非常に興味深い。

同様な手段は $CaCO_3$ を含む土壌(乾燥地に広大に分布している。)にも適用される可能性がある。現在、特に南カリフォルニアを中心にその応用が検討されているが、石灰石の場合と違って、土壌中に存在する $CaCO_3$ は通常長い土壌生成の過程で、粘土、コロイド、等と一緒に土層中に層をなして沈澱したものであり、余り高い濃度の硫酸水を流した場合、発泡作用とともに完全な分散状態となり、逆に透水が悪くなる場合がある。与えられた土にどれ程の量と濃度で、どのように投入すれば最大効果が得られるかは未だ研究の段階といえる。

(3) 生物的方法 単体のイオウを土壌に投入した場合、土壌中の微生物の作用によって酸化反応が起り、硫酸に変るという事等を除いて現在まで実用に値する方法はない。又作物の根から出る CO_2 が $CaCO_3$ の溶解を促進し、 Ca^{++} 補給に役立つとする仮定でなされた実験では、透水性向上への貢献は小さいことが示されている。作物を栽培することによる透水性の向上は、むしろそれによる土壌構造の発展によると見なすべきであろう。

おわりに

水質、特に水中のイオンが土壌の透水性に影響する現象は、基本的には粘土鉱物の膨潤によるものとする考え方から、その特性化、水質基準に対する見解、及び、水

質の改良についての概要をとりまとめたものである。土壌の側面を考慮した水質の問題を考える場合の一助ともなれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Allison L. E.: Effect of micro-organisms on permeability of soil under prolonged submergence. *Soil Sci.* 63; 439-450 (1947)
- 2) Avnimelech Y and Z. Nevo : Biological clogging of sands. *Soil Sci.* 98 : 222-226 (1964)
- 3) Baldar N. A. and L. D. Whittig : Occurance and synthesis of soil zeolite. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 32; 235-238 (1968)
- 4) Bolt G. H. and R. D. Miller : Calculation of total and component potentials of water in soil. *Trans Amer Geo Union* 39; 917-928 (1958)
- 5) Bower C. A. and M. Maasland : Sodium hazard of Punjab ground waters. p.49-61 In "Symposium on water-logging and salinity in West Pakistan". Golden Jubilee Session of West Pakistan Eng. Cong. (1963)
- 6) Bower C. A. G. Ogata and J. M. Tucker : Sodium hazard of irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation of calcium carbonate. *Soil Sci.* 106; 29-34 (1968)
- 7) Christiansen J. E. : Effect of entrapped air upon the permeability of soils. *Soil Sci.* 58; 355-365 (1944)
- 8) Doering E. J. and R. C. Reeve : Engineering aspects of the reclamation of sodic soils with high-salt waters. *Irrig. & Drainage Div. ASCE* 91; 59-72 (1965)
- 9) Eaton F. M. : Significance of carbonate in irrigation waters. *Soil Sci.* 69; 123-133 (1950)
- 10) Gardner W. R. M. S. Mayhugh, J. O. Goertzen and C. A. Bower Effect of electrolyte concentration and exchangeable sodium percentage on diffusivity of water in soils. *Soil Sci.* 88; 270-274 (1959)
- 11) Goertzen J. O. and C. A. Bower : Carbon dioxide from plant roots as a factor in replacement of adsorbed sodium in calcareous soils. *Soil Sci. Soc Amer Proc.* 22 ; 36-37 (1958)
- 12) Jones J. H. and G. S. Taylor : Septic tank effluent percolation through sands under laboratory conditions. *Soil Sci.* 99 ; 301-309 (1965)
- 13) Kelley W. P. : Sodium carbonate and adsorbed sodium in semiarid soils. *Soil Sci.* 94 ; 1-5 (1962)
- 14) Kemper W. D. : Water and ion movement in thin films as influenced by the electrostatic charge and diffuse layer of cations associated with clay mineral surfaces. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 24; 10-16 (1960)
- 15) Langelier W. F. : The analytical control of anti-corrosion water treatment. *J. Amer Water Works Asso.* 28 ; 1500-1521 (1936)
- 16) Letey J., W. D. Kemper and L. Noonan : The effect of osmotic pressure gradients on water movement in unsaturated soil. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 33 ; 15-18 (1969)
- 17) McNeal B. L. and N. T. Coleman : Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 30 ; 308-312 (1966)
- 18) McNeal B. L., W. A. Norvell and N. T. Coleman : Effect of solution composition on the swelling of extracted soil clays. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 30 ; 313-317 (1966)
- 19) McNeal B. L., G. A. Pearson, J. T. Hatcher and C. A. Bower : Effects of rice culture on the reclamation of sodic soils. *Agron. J.* 58 ; 238-240 (1966)
- 20) McNeal B. L. : Prediction of the effect of mixed-salt solutions on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 32 ; 190-193 (1968)
- 21) McNeal B. L. : Prediction of interlayer swelling of clays in mixed-salt solutions. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 34 ; 201-206 (1970)
- 22) Mitchell R. and Z. Nevo. : Effect of bacterial polysaccharide accumulation on infiltration of water through sand. *Applied Microbio.* 12 ; 219-223 (1964)
- 23) Pratt P. F. and F. L. Bair : Sodium hazard of bicarbonate irrigation waters. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 33 ; 880-883 (1969)
- 24) Reeve R. C. and C. A. Bower : Use of high-salt waters as a flocculant and source of divalent cations for reclaiming sodic soils. *Soil Sci.* 90 ; 139-144 (1960)
- 25) Reeve R. C. and E. J. Doering : The high-salt-water dilution method for reclaiming sodic soils. *Soil Sci. Soc Amer Proc.* 30 ; 498-504 (1966)
- 26) Rhoades J. D. and R. D. Lngvalson : Macroscopic swelling and hydraulic conductivity properties of four Vermiculite soils. *Soil Sci Soc Amer Proc.* 33 ; 364-369 (1969)
- 27) U. S. Salinity Lab. Staff. : "Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils" USDA Hand Book 60
- 28) Wilcox L. V., G. Y. Blair and C. A. Bower : Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation. *Soil Sci.* 77 ; 359-265 (1954)

地下水現象への土壌物理学的接近

木 村 重 彦*

飽和粘土内の流れが非ダルシー流になることは土壌物理学の分野で、十数年前にとりあげられ、その後この立場はシルト層の流れにも波及された。しかし、非ダルシー流そのものの確認や実態解析については多くの反論があり、未だ定説とされているものはない。また、砂層や砂レキ層の飽和浸透流については、当然ダルシー流とされている。

しかるに、最近野外で実証されてきた地下水流の実態は、その殆んどが従来のダルシー流で解析することがむずかしく、しかも、非ダルシー流的な考え方にたつと非常に満足に解析できることになった。これらの実態と解析結果について、ここに概略的な内容紹介を行なうものである。

I. は し が き

地下水は安易で低コストの開発可能水源として着目され、最近数20年間にその利用量は指数的に増加した。このため、わが国各地で過剰揚水による地下水位の低下、湧水の涸渇、海岸地域帯水層への海水浸入、沖積平野での広域地盤沈下発生、都市地域井戸からの酸欠空気上昇などという数々の異常事態を招いた。これら異常事態を招くほどの大幅な環境条件の変化は、地下水流に関する諸因子の軽重やそれらの特徴を明瞭に描き出した。とくに近年高度に発展した地下水の地域的水収支シミュレーション法や放射能利用の地下水流実証法などで示された地下水流の特徴的現象は、ダルシー則を基礎に、 $\nabla^2=0$ とした数学的積み重ねに偏重した従来の地下水流解析法に対し、根本的反省を余儀なくさせるほどの事態を招いている¹⁾。

ここでは、見出された地下水流の特徴的現象を紹介するとともに、それらの現象に対する土壌物理学的思考方法の有効性についてふれてみることにする。

II. ダルシー則の抜け道 ——地下水流はすべて非ダルシー流ではないか——

地下水流理論の基礎とされているダルシー則は、細砂のような多孔性構造と石灰岩層のようなきれつ性構造の

いずれにも適用できる²⁾。このことは、流路に曲折さえあれば、有効空ゲキ率とは無関係に、断面的流量が動水勾配の1次関数になるという非常に内容の広い一般則である。しかし、それは現実の地下水流解析に万能選手となるだろうか。

地下水資源を評価するときに、有効空ゲキ率の大小と循環水の実流速とは停滞水量と循環水量を定める基本因子となる。このため、新しい方法を使ってこれらの真の値を追求してきた。その結果、多孔性構造の有効空ゲキ率は室内試験と野外試験で全く違う値になることが明らかになってきた。地下水流動の対象層とされている砂層や砂レキ層の室内透水試験によると、追跡子の示す平均流速はみかけの平均流速よりわずかに速く示される³⁾。よって、有効空ゲキ率は空ゲキ率よりわずかに小さいことを理解することができる。しかるに、わが国各地の地域的地下水流動を水収支シミュレーション法で解析してみると、有効空ゲキ率は空ゲキ率の数%~十数%にすぎないことが見出されてきた^{4)~6)}。この事実はまた、わが国を含めた世界各地の野外試験で、人工の放射性追跡子や水に含まれているトリチウム濃度ピーク(注2)を指標に求めた地下水流速が、揚水試験結果から求めた値より約1桁大きくなるという事実からも裏付けられる⁵⁾。

このように室内と野外で有効空ゲキ率にかなり大きな差異が存在している原因を、既往の透水試験結果の中に求めてみよう⁶⁾。図-1の斜線部分はわが国の帯水層が与えられている条件範囲で、左が透水層の水平流動、右が難透水層の垂直浸透範囲である。図面上部の④~⑥の実験値は、従来から認められている乱流領域での透水係数変化例である。そして、動水勾配に関係なく透水係数が一定になるというダルシー領域は、図から明かなように、わが国の帯水層が自然条件で与えられている動水勾配範囲よりも、はるかに高い値で示される現象となる。しかも、既往の室内実験のほとんどは、このダルシー領域で実験されていた。この室内実験の有効性の根拠のひとつにされた実験例が図の左に示してある。しかし、これは径がわずか1cmで、長さが1mもあるU字管に砂をつめた実験のため、壁面の影響が大きく示されたものではないだろうか。そして、わが国の帯水層条件に

* 農林省農業土木試験場 (1972.8.31.受理)

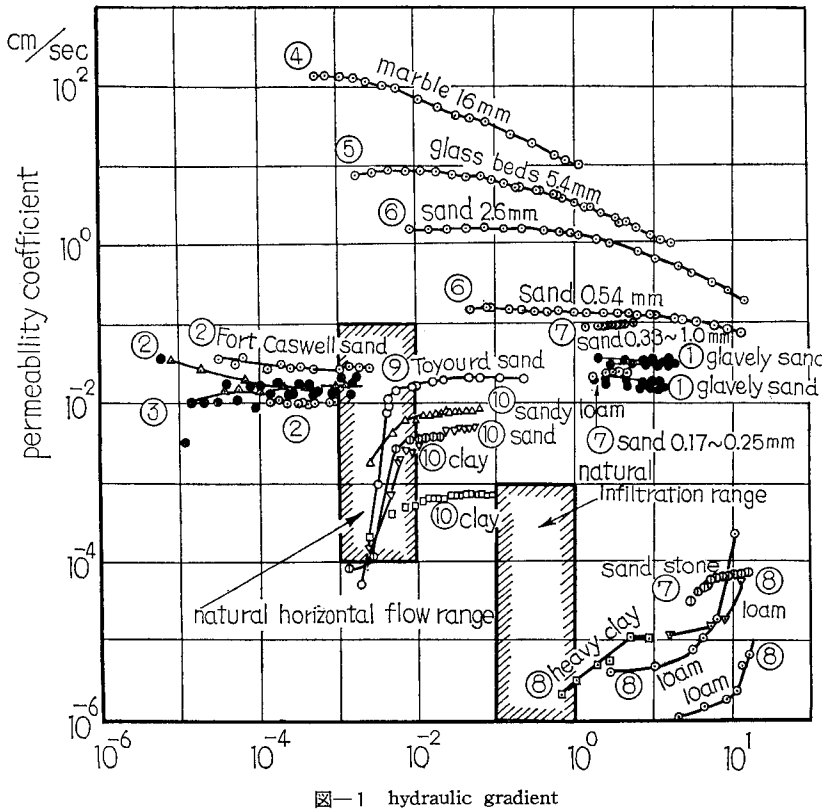


図-1 hydraulic gradient
 実験者：①Darcy (1856), ②Meinzer and Fishel (1934), ③Fishel (1935),
 ④don Kirkham (), ⑤Brownell and Katz (1947), ⑥Ahmed and Su-
 nada (1969), ⑦King (1898), ⑧多田 (1965), ⑨根岸 (1972), ⑩長田 (1966),

図-1 既往の室内実験で示された動水勾配と透水係数の関係

近い実験例では、動水勾配の減少とともに透水係数が急激に低下するという非ダルシー現象の領域になることが、土壌物理研究者達の実験で示されている。

よって、一般的室内試験と野外試験との有効空ゲキ率の差異は、後者が前者より1桁も低い動水勾配のために生じた非ダルシー流の発生を実証したものであり、土壌物理研究者達の室内試験で示された動水勾配の減少による透水係数の急激な低下現象は、野外試験結果からみて、有効空ゲキ率の急激な低下がその大きな要因になるものと考えられないだろうか。もしこれが事実ならば、地下水学は根本からやり動かされることになってくる。

では、何故今までダルシー則が適用できたのであろうか。野外の地下水流評価の基礎とされてきた揚水試験では、井戸周辺の地下水流すなわちダルシー領域の地下水流に対する透水係数を求めることになる。この透水試験や従来の室内試験というダルシー領域の透水係数を用い、しかもダルシー則で地下水流が評価できた理由のひとつは、自然条件の動水勾配変動が非常に小さいということにある。このため、透水係数はほとんど変化しない

ので、ダルシー則が有効空ゲキ率に無関係という特徴から、この法則の適用を可能にしたのではない。第2に、従来は地下水流を正確に実証できなかったのではないかと考えられる。揚水試験や一般の透水試験で求めた透水係数の値は実際の値より数倍大きくなる。しかし、この程度の誤差は、自然の地下水流を大幅に変化させるような人為条件が与えられず、ししも地下水流を実証できなかった以前の段階では問題ならなかったのではないかと。そして後述の理由から、この水平流動への過大評価と過信が今日の地下水に起因した異常事態を招く大きな要因になったともいえるのではないだろうか。

Ⅲ. 地下の自然水流は、
 すべて始動勾配に近い
 条件にあるのではない
 か。

地下水流評価の基礎とされてきた揚水試験の理論としては、当初揚水で生じた水位低下の影響範囲

である影響圏を揚水井から一定距離までと考えた平衡式を用い、影響圏に300~500mを代入していた。その後、影響圏は経時的に無限に拡がるという非平衡式に進展した。それは、地下水流をニュートン流と考えたとき、当然のことになる。しかるに、武蔵野台地で数多くの揚水試験データを検討した結果、非平衡式よりも平衡式を適用した方が妥当性が高いという傾向が見出されてきた⁷⁾。このように影響圏が比較的短距離で落ち着くという現象は、地盤沈下地域でも沈下範囲が揚水井から1~2km以内の短距離に限られるという現象として示されている。よって、地下水流は粘性流動とみなせるのではないかと。そして自然条件の地下水流は始動勾配に近い値にあるのではないかと考えられてくる。また、前述のように、透水層の有効空ゲキ率の値が非常に小さいことも自然の地下水流が始動勾配に近い値になることを裏付けるものにならないだろうか。

次に不飽和帯の垂直透浸についても興味深い事実が見出された。一般的に自由地下水面は降水後2~3日で上昇することが多い。これは、降水が不飽和帯の空ゲキ部

分を2～3日かけて透過し、地下水面に到達するものであり、事実、不飽和の透水試験値からも、これを裏付けられるとされてきた。しかし、実際に野外で不飽和帯の水を深さごとに採取し、水中に含まれているトリチウム濃度(注2)を測定してみると、それは降水のトリチウム濃度の経時変化と、非常によく一致している⁸⁾。そして、その透浸速度はドイツの砂質ロームで1～3m/年⁸⁾、米国のシルト質ロームで0.2～0.4m/年⁹⁾、相模原台地ロームで1.45m/年⁵⁾という従来よりもはるかに遅い速度になることがわかってきた。

これらの事実から、地下水面上の不飽和帯の水分は作用としての重力と反作用としての化学ポテンシャルとのバランスがとれた連続系の中で静止している。そして、降水という重力増で、そのバランスがくずれ、結合水を除くすべての水が下方に押し出されるような流れとなる。したがって、気泡が存在しても、これを伝わる流れというものは、きわめて表層の範囲以外には存在しない。そして、降水後2～3日で地下水面が上昇する現象は、不飽和層内の水の重力伝播速度を示すというように考えられてくる。最近、かんがい水量と地下水面の相関性が問題にされてきたことも、これを裏付けるものでないだろうか。

以上から自然状態の地下水も不飽和帯の水も、基本的にすべてが重力と化学ポテンシャルとのバランスがとれたひとつの連続した静止系として存在し、降水の透浸によるバランスの乱れで、すべてが始動勾配に近い流れを生じているということになる。これはきわめて当然の考え方である。しかし、現実の現象解析では、第1にこの静止状態から流動状態への現象解析が不十分でなかったか、第2に、地下の水を一つの連続する系としてとらえずに、水平流のみ、あるいは垂直透浸のみという断片的把握に終わったことが、現実の現象解析を不十分にしかかったという問題が残されることになる。

IV. 揚水による地下水流の変化

これら二つの問題点、そしてIIで提案した自然条件の地下水流が非ダルシー流であるという考え方の是非は、揚水という人為条件が加えられたときの地下水流の変化状態の解析で明確化されることになった。

まず第1の地下水流動現象の問題である。トリチウム dating 法(注1, 2)で実際の地下水流を解析してみると、自然の帯水層中にはトリチウム濃度がほぼゼロという約100年以前の降水すなわち停滞水が、非常に大量に存在していた。そして、揚水という人為条件が加えられると、この停滞水が帯水層から引き抜かれて循環水化するという現象が見出されてきた⁵⁾⁶⁾。しかも、この自然

状態の停滞水が循環水化する現象は、揚水量がかなり少ない場合にも発生し、揚水量の増加とともに増大して、遂には揚水のほとんどすべてが自然状態の停滞水で占められるという状態さえも存在していた⁵⁾⁶⁾。

このように、動水勾配の増加で有効空ゲキ率が増加する現象は、前述の考え方から、室内実験で求められた動水勾配の増加で透水係数が増大するという非ダルシー流を裏付けるものにならないだろうか。また、揚水とともに自然状態の停滞水が引き抜かれるということは、揚水で地層収縮が生じ、地盤沈下が発生するということに結びついてくる。これは従来、ダルシー則で評価できなかった地盤沈下問題を、初めて地下水流に直接関係する問題としてとりあげることになる。

つぎに第2の地域的地下水流の問題である。揚水による地下水流そのものの変化も従来の考え方と非常に異っていた。従来の考え方によると、透水層からの揚水で生じた水位低下を補うものは、周辺地域から透水層を通る水平流であった。しかるに、トリチウム dating 法の利用で実証された状態は、全く異っていた。揚水による地下水流の変化は、水平流動、垂直浸透のいずれにも影響を与えていた。しかもそれらを量的に検討すると、透水層の水平流量の増加は非常に少なく、供給される水量の殆んどは垂直浸透で補われていた。そして、透水層上部がシルトや粘土層のような難透水性地層の場合には、垂直浸透量に占める層内からの停滞水引き抜き量の比率が大きくなり、しかもこの引き抜き量にほぼ相当する地層収縮が生じて、これが地盤沈下現象となっていた⁶⁾。

このような現象を土壌物理的にみると、それは少しも異常とはならない。揚水による水位低下が招く水平流と垂直流との動水勾配変化率は明らかに後者が大きい。そして、流動面積もわずか数m厚さの水平流動面積より、平面的に拡がる垂直浸透面積の方がはるかに大きい。これらの理由で水平流よりも垂直浸透量が大きくなる現象を理解することができる。また、地層収縮問題に対しては、動水勾配の増加で有効空ゲキ率が増加するが、圧力伝導速度が遅いので、空ゲキ内の流れは急激な地下水位変化による入口のない流れ、すなわち、しぼり出しの流れを招き、これが地層収縮を生ずると説明できる。したがって、今後は、このような土壌物理的現象を把握した上での地域的地下水流という考え方が、現実の地下水流問題解析法の主流となってくのではないだろうか。

V. 地下水流は水みちの流れ

——ビンガム流の仮説——

揚水中のトリチウム濃度解析によると自然状態では帯水層空ゲキのほとんどが停滞水で占められ、残り数%の有効空ゲキ内を循環水が流動していた。この有効空ゲキ

内の流れが水みち的なものであることは、炭素-14 dating (註1) 結果にも示されている。炭素-14は地層中の炭素と置換するため、dating 解析が非常にむずかしいことが基礎実験で実証されている。しかるに、野外の炭素-14濃度を測定してみると、地層中の炭素と殆んど置換されていない¹⁰⁾。これは、循環水が水みちの流れであり、他の水や地層と反応しにくい条件にあることを示すものでないだろうか。そして、また自然の流れが水みち的であるという事実は、地層を掘き出したときに必ずみかける現象であり、それはまた、ダルシー則では説明しにくいものであった。

では、次に有効空ゲキ内の流れをどのように理解したらよいだろうか。トリチウム dating 法の測定結果を見ると、地下水のトリチウム濃度はどのような地層であっても、それは降水のトリチウム濃度と同じ傾向の経時変化を示していた⁵⁾。これは、最近における降水の循環系がどのルートを通っても同じ時間にその点に到達するという予想もしなかった事実を示したことになる。もし、それぞれの水みちの距離や混合・分散による流速に変化があれば、このような現象は生じない。このような条件を満足する流体として、筆者はピンガム流体を仮定してみた。そうすると、栓流の特徴から一定の動水勾配では、一定の直径以上の空ゲキでなければ水が流動しないこと。混合・分散は Hagen-Poiseuille の流れよりはるかに少なくなる。そして、動水勾配の増加とともに流動できる水みち径が段々小さくなり、有効空ゲキ率が增大することなど、実際の現象を満足できることになる。そこでこのような立場から、多孔性構造に対する一つの流れモデルをたてて、簡単な数式展開をしてみると、これまでのべた地下水流の諸特徴のすべてを満足するようなモデルになり、また、それは野外でのトリチウム濃度による地域的地下水流の解析に有効に利用することができた。

VI. む す び

以上のように、最近見出された地下水流の諸現象は土壌物理的観点にたつと非常に容易に理解できるものであった。しかも、この考え方にたつと、現在地下水学で問題となっている塩水浸入や人工地下水注入などの障害原因を明らかにし、その対策上の指示を行なう可能性もある⁵⁾。提案した考え方は、まだきわめて幼稚でマクロな把握にすぎない。しかし、今後の土壌物理的観点にたった現象把握法の進展によって地下水学が飛躍的に進展されるだろうことは、疑がないのではないだろうか。

(註1) Dating 法: 1947年に Libby が提案した。原理は提案当初より拡張解釈され、今日では次のようになってい

る。すなわち、自然状態の地下水流中に極微量混入している放射性物質の濃度変化は、その物質の放射性減衰にしたがう。よってその物質の地下水混入時点の濃度が既知ならば、地下水混入後の経過時間は任意地点の地下水中の微量物質の放射線強度の測定値から求めることができるというもの。利用物質としては降水に混入されているトリチウム、炭素-14、ナトリウム-22、シリカ-32、などの外に地中の岩石から溶出するウラン、トリウム系列の諸元素などがあげられている⁵⁾。

(註2) トリチウム dating の手法: トリチウムは水素の同位元素で、化学記号を T で表わすと、水の中に HTO という分子形で必ず含まれている。トリチウムは半減期約12年でベータ線を放出するので、今日の放射線測定技術によると水中のトリチウム濃度を 10^{-14} ppm という低濃度まで測定することができる。自然状態における降水には太陽から直接飛来したり、太陽や宇宙から飛来する放射線と大気圏のチッ素原子との核反応で生じたトリチウムが約 10^{-13} ppm の濃度で含まれていた。このため、dating 法の原理から、地下水のトリチウム濃度測定によって、約100年前までの降水期間についてはその降水時期を求めることができる。しかし、1952年以降の大気圏における水素爆弾実験で発生したトリチウムが地球全体を汚染し、降水中のトリチウム濃度を最大約100倍としてしまった。現在でもわが国の降水は自然状態の約10倍の濃度を示している。このような人為汚染を受けることになったが、この期間の降水のトリチウム濃度は降水ごとに個々の濃度を示すので、降水のトリチウム濃度経時変化を指標に解析すれば、地下水における最近20年間の降水の地下水浸透状態も求めることができる。また、通常物質で潜水層中の地下水流動を追跡する場合、イオン交換や吸着反応の影響が大きく示されることになるが、トリチウムはそのような影響を殆んど考慮する必要がない。このため、トリチウム濃度分布の経時変化から地下水流動が実証できることになる。このように地下水のトリチウム濃度の dating 能と理想的追跡能との両者を利用することによって、地下水流の実態が解析できるようになった。

参 考 文 献

- 1) 山本荘毅: 日本における地下水の開発に関する諸問題と保全について, 科学技術庁資源調査所資料, 防災373, 地盤48, 3~4. (1970)
- 2) クリメントフ, プイハチエフ: 地下水の力学, 外尾・永井訳, ラティス (1967), 25. (1961)
- 3) 木村・他3名: 人工の放射性追跡子による地下水の流れの研究, 農土試報7, 91~118. (1969)
- 4) 柴崎達雄: 広域地下水開発とその管理, 現代日本の地下水研究, 25~39. (1970)
新藤・柴崎・鎌田: 関東平野における地下水の酒濁, 日本地質学会第79年学術大会, 地盤と地下水に関する公書, 7~17. (1972)
- 5) 木村重彦: 水中のトリチウムによる地下水の流れの研究

- (I), 農土試報9, 1~45. (1971)
- 6) —: 同上 (II), 農土試報10, 1~42. (1972)
- 7) 細野義純: 武蔵野の地下水, 東教大水文学部—談話会 (1967)
—: 武蔵野台地の自由地下水—とくにその変動の性状について—, 地質学会大会 (1968)
—: 武蔵野市吉祥寺における揚水実験資料, 消防研技術資料2, 1~101. (1969)
—: 武蔵野台地における帯水層の性状に関する調査資料, 同上3, 1~205. (1970)
- 8) Zimmermann, U. D. Ehhalt and K. O. Münnich : Soil-water movement and evapotranspiration ; Changes in the isotopes composition of the water, I. A. E. A., Vienna-Austria, SM-83/27. (1967)
- 9) Schmalz, B. L. and W. L. Polzer ; Tritiated water distribution in unsaturated soil, Soil Sci. 108, 43-47. (1969)
- 10) Geyh, M. A : Carbon-14 concentration of Lime in soils and aspects of groundwater' Isotope Hydrology 1970, I. A. E. A., 215~223 (1970)

マレーシア・ムダかんがい事業における水稻二期 作導入と地耐力について

八 島 茂 夫*

I. ま え が き

筆者はたまたま機会を得て、1971年5月より2年間の予定で西マレーシア最北部に位置するムダかんがい事業地域において調査活動に従事している。マレーシアには約30万haの水田があるが、当事業地域はそのうち約1/3の10万haを占め、5万戸の農家を擁するマレーシア最大の穀倉地帯である。この国では米は自給されておらず、毎年凡そ20万トンの米を主にタイから輸入しているが、1966年に発足した第一次マレーシアプランで、国民経済に寄与するとともに、とかく中国系人から経済的に押され通しのマレー人（マレー人の大多数は農民である。）の経済力を強化し生活水準を向上させる目的もかねて、国内における米の自給をはかるための施策を講ずることとなった。かんがい施設を整備し、従来雨季にしか作付できなかった水田に二期作を導入し、米の飛躍的増産をはかることはこのプランの一つの大きな柱となっている。

ムダかんがい事業はこのような背景のもとに全国民の注目を集めて実施された事業で、ここでは単にかんがい施設の整備のみにとどまらず、道路網の配置、大型モミ乾燥機の建設、農民組織の編成を含めた総合開発事業である。農民組織は、概ね4,000ha毎に農業協同組合が組織され、農業資材の供給、営農資金の融資、新しい農業技術の指導・普及に携わる一方、大型農機具を保有して農作業の機械化をはかり、当地域における農業の近代化を強力に推進しようとしている。本事業の附属機関の一つにはF. M. T. C. (Farmers' Mechanization Training Center) というのがあり、ここでは農民に対して大型農機具に関する訓練が行なわれており、この件に対するマレーシア政府の熱意の程がうかがわれる。

本事業の基幹工事であるダム、幹線水路、支線水路網等は1970年にほぼ完成し、その年初めて一部地域に二期作が実施され、今年は事業地区の約20%の水田で乾季の作付が行なわれている。当地区の地形は平均勾配約5,000分の1程度の排水不良の低平地である。二期作が実施さ

れると当然湛水期間が長くなり、このような排水不良地帯では田面乾燥の機会が極端に少なくなり、地耐力が低下するのではないかと一般に考えられるが、実際にムダ地区では二期作地帯での地耐力の低下が最近特に目立つようになり、大型機械導入によって農業の近代化を目指そうとする当事業にとって由々しき問題となってきた。

筆者は昨年9月からこの問題を調査対象の一つに加え、マレーシア政府と協力して対策の手掛りを得ようとしている。以下その調査の概要を簡単に紹介する。

なおムダかんがい事業の概要については、農業土木学会誌第4巻・第5号に筆者の前任者、林堯氏の紹介文があるので参考されたい。

II. 調 査 の 目 標

開発途上国における最近の人口の急増は、その食糧を確保するために将来稲の多期作化が各国で計画実施されるようになるものと考えられる。この場合、日本における終戦直後のように食糧の絶対量を確保すればよいということであれば話は別であるが、経済性も重視されるとすれば、ムダかんがい事業のように機械化農業が当然志向されるであろう。マレーシア政府の説明では、当事業地区の乾季作ではその収穫期が雨季に入るので、大規模なモミ乾燥機を導入しなければならず、その効率的な運用のため道路網の整備によるモミ集荷の円滑化、機械化により作期を統一し短期間に集中的にモミの乾燥処理をできる態勢を整えることが必要であるとしている。

当初、ムダ事業計画では二期作導入による地耐力の低下は計算に入れられていなかった。ところが、前述のような地耐力の低下が現われマレーシア政府はこの対策に苦慮しているところであり、このため次のような地域分類から手をつけ、それぞれの状況にあった対応策を検討してゆこうとしている。日本でこの種の問題の対策として普通行なわれているような排水改良事業は大規模な機械排水、減水深増に伴うかんがい施設の増強等の対策が必要なため、ここでは経済的理由から問題外とされている。

* 農林省熱帯農業研究センター (1972.8.31, 受理)

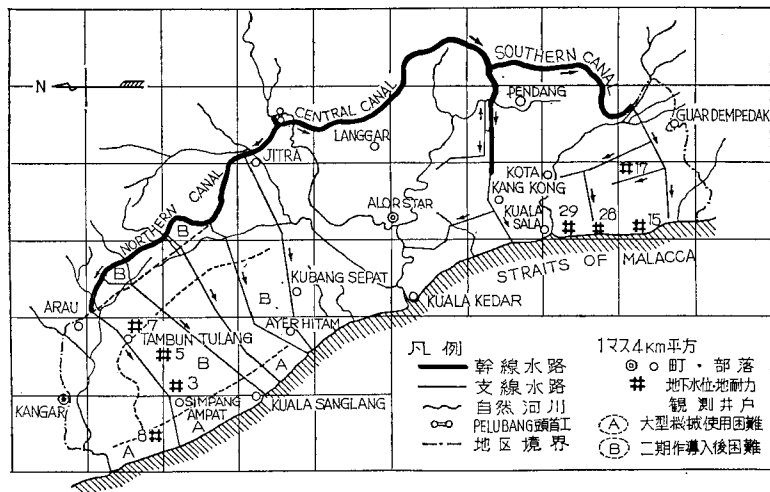
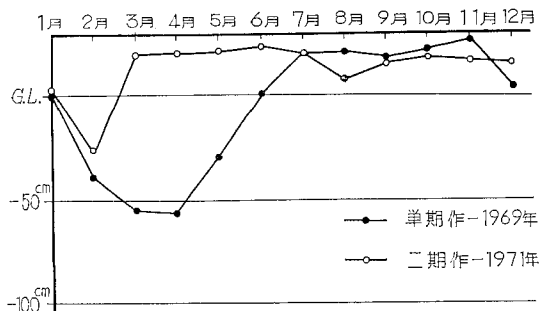


図-1. 観測地点位置図

- A地域：特別な対策を講じなくとも大型機械作業が可能な地域
- B地域：大型機械に補助輪を装置する。水管理を工夫することによって地耐力を維持する。(例えば、間断かんがいの導入、田面乾燥をできるだけはかるため作期を移動する。)等の対策により大型機械作業が可能になる地域
- C地域：特殊な低接地圧機械の開発・導入が必要な地域
この分類のため地区内一斉観測を本年の12月に予定している。12月は全般的に最も地耐力が低くなる時期であるとともに、公式行程では雨季作の収穫期にあたり、大型機械作業にとって重要な月だからである。

III. 地耐力低下の実態

本調査の第一段階として、二期作地域の地耐力の分布地図を作るため、地耐力の年変化を観測して調査時点を決めることとした。常識的には、二期作によって最も顕著に現われる現象は地下水位の上昇であり、これが土壌

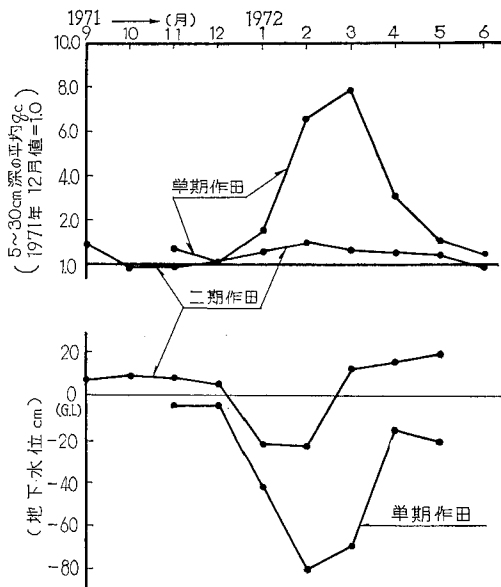


D.I.D.による月別観測値の平均値。
観測地はWELL No. 3, 5, 7, 8,

図-2. 二期作導入による地下水位変化の一例

構造に変化をもたらし、地耐力の低下をもたらすものと考えられる。そこで地下水位と地耐力を同時に観測するのに便利な地点を図-1のように選定した。これらは現地の D. I. D. (Drainage and Irrigation Department) が数年前から地下水位を観測している井戸で水田に隣接しているものである。井戸の開水面積は10~20m²、深さは2~3 m程度のもが多く、農家の飲雑用水に使用されている。北部の観測井戸、No. 3, 5, 7.の地点は1970年、No. 8 は1971年、No. 15, 17. は1972年から二期作に入っている。No. 28, 29. では来年度に予定されている。

図-2 は北部の3カ所の井戸における1969年(単期作)および1971年(二期作)の D. I. D. のデータから地下水位の変化をみるため、月平均値をグラフに表わしたものである。ここではかんがい期には地下水位は田面湛水位近くまで上昇するようであるが、これは以前かんがい施設の整備されていない時分からの習慣で、かんがい用水の不足を補うため排水路の水門を閉め切り、地下水位を



二期作田 Well No. 3, 5, 7.
単期作田 Well No. 28, 29.
1971年12月のqc値
二期作田 1.47 kg/cm²
単期作田 1.34 kg/cm²

図-3. 水田地耐力の季節変化

表一 土 壌 の 物 理 試 験

分 類	地 点 名	深 度 cm	透 水 係 数 (cm/sec)	真 比 重	三 相 分 布 (%)		
					固	液	空 気
当初より大型機 械使用困難	1. KANG KONG	10~15	4.35×10^{-5}	2.42	38.8	57.3	3.9
		25~30	1.89×10^{-5}	2.43	40.6	55.8	3.6
		40~45	6.29×10^{-5}	2.47	43.2	52.3	4.5
	2. KUALA SANGLANG	10~15	9.51×10^{-6}	2.52	45.8	49.3	4.9
25~30		3.21×10^{-6}	2.56	46.5	50.4	3.1	
40~45		2.04×10^{-5}	2.53	43.7	53.0	3.3	
二期作導入 により困難	3. KUALA SALA	10~15	9.46×10^{-4}	2.49	42.7	53.7	3.6
		25~30	1.97×10^{-5}	2.46	44.0	53.0	3.0
		40~45	6.73×10^{-5}	2.49	38.4	58.2	3.4
	4. TANBUN TULANG	10~15	—	2.61	34.6	58.7	6.7
25~30		7.75×10^{-4}	2.57	45.6	52.0	2.4	
40~45		2.25×10^{-7}	2.57	45.8	51.3	2.9	
大型機械使用 可能	5. LANGGAR	10~15	2.13×10^{-4}	2.48	51.2	44.1	4.7
		25~30	6.02×10^{-5}	2.48	53.0	44.0	3.0
		40~45	1.14×10^{-4}	2.53	52.1	44.2	3.7
	6. JITRA	10~15	2.07×10^{-5}	2.39	54.3	41.7	4.0
25~30		8.88×10^{-6}	2.52	54.7	41.6	3.7	
40~45		3.49×10^{-5}	2.36	56.7	38.9	4.4	

分類は F. M. T. C. TELOK CHENGAI 調査による。

常時高く保っていることが原因のようである。一方当事業における用水計画では1日当り減水深を浸透量蒸発散量併せて6mm程度しか見ておらず、又筆者の当地における観測では蒸発散量だけでも多い日には7mmあるので、こうでもしなければ現在でも水不足は免れないであろう。これが地耐力を低下させる要因であり、排水改良事業を簡単に興せない理由ではなからうか。

図一3 は地耐力の季節変化を表わしている。二期作田は観測井戸 No. 3, 5, 7 の平均値で、二期作3年目の水田である。前作期の収穫は1月に終り、1月から2月にかけて田面は乾燥状態にあった。3月からかんがいが始まり、4月から5月にかけて乾季作の田植が行なわれている。地耐力の変化は単期作田に比べて極めて小さい。これらの水田では8月頃に収穫が行なわれるが、この時点では水が落さるので地耐力は一定上昇し、次の収穫期12月には年間最低値を示すものと思われる。一方単期作田は観測井戸 No. 28, 29 地点の平均値で、12月に収穫が終り、1月から3月にかけて田面は乾燥状態にあった。4月からは降雨のため水田は湿潤ないしは湛水状態にあり、地耐力はそれ以後急速に低下している。ここで雨季といっているのは9月から11月までで、乾季は12月から3月までである。4月から8月までは稲を作るには

表二 土 壌 の 粒 度 分 布

深 度	礫 (%)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)
0~25cm	—	8.0	50.0	42.0
25~50	—	4.0	35.0	61.0
50~75	—	6.0	43.0	51.0
75~100	—	4.0	30.0	66.0

中川昭一郎・前川 (1969年5月)
REPORT ON THE WATER DISTRIBUTION IN
FIELD IN THE MUDA RIVER IRRIGATION
PROJECT AREA.
土壌採取地点 KUBANG SEPAT.

十分ではないがかなりの降雨があり、この時期に乾季作が行なわれる。

図一4 は地耐力の垂直分布の状態を比較したものである。垂直分布で一つ目につくことは、今まで地耐力を測定してきた全ての水田で耕盤の存在が認められなかったことである。日本ではトラクタの走行性を判定するのに、地耐力の垂直分布の形態により表層支持型地盤と耕盤支持型地盤とに分類して判定する案が提案されているが、ムダ地区の水田の場合にはそのどちらにも適用し難い。現在この稿に用いている地耐力のデータは表層支持

型地盤の判定規準である5~30cm深の平均qcで整理してあるが、この当否についてはいまのところ判定する根拠がない。

表一1の物理試験は現地のF.M.T.C.の聞き取り調査に基づいた分類により整理したもので、大型機械使用可能地域でのみ三相分布の固相の割合が50%を越えているのが目につく。土壌の物理試験については器具の不備のため表一1程度の項目しか今のところ実施できない。尚参考までに1969年5月、当地において中川、前川氏が行なった土壌粒度分布試験の結果を表一2に紹介しておく。

IV. お わ り に

マレーシア政府のこの問題に対する対策の考えには2通りあり、営農部門の指導者は低接地圧機械の開発、建設部門では間断かんがい等による地耐力の維持を目標としている。低接地圧機械はどうしても普通トラクタに比べ多くの面で性能が劣ると考えるのが順当であり、できるだけ地耐力を維持しながらどうしても所定の強度を得られない地域へは低接地圧機械を適用するということになる。

しかしながら地耐力向上をはかるためにはまだ多くの解決しなければならない問題が残っている。例えば、この水路網は整備されたといっても2km毎に支線水路が配置されているだけであり、最末端の2kmの区間は田越かんがいで配水されているため、全域に用水がゆきわたるには約1カ月もかかる。間断かんがいを採用し地耐力を維持しようとするためには、まずこの末端配水の問題を解決しなければならない。地区内でもパイロットプロジェクトと称して、試験的にコンクリートU字フリュームで末端水路を施工した100ha程の地区はあるが、確かに水管理は大幅に改良されたが、これを全域100,000ha

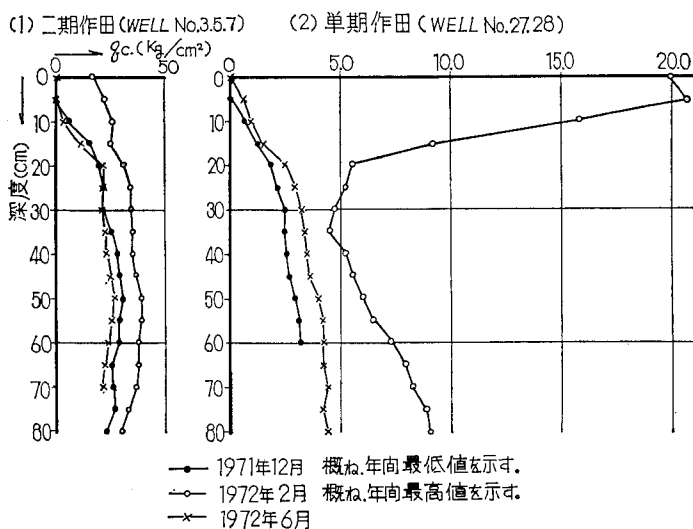


図-4. 地帯力垂直分布の比較

に及ぼすことは経済的に莫大な負担であり、他にもっと経費のかからない方法で配水の合理化を実現できる技術の開発が急がれている。又節水栽培を実施することにより、それぞれの地域で地耐力の向上を期待するとともに、全体の10%なり5%なりの特に地耐力の弱い地域に排水改良工事を施工し、このためのかんがい用水を生み出すという案も考えられる。この場合にも、前述の如く用水の潤沢でない地区であるから精度の高い水管理が要求される。ここでは局地気象、特に降雨量の差が非常に甚しく、幅15km長さ20kmという広大な地域の水管理は非常に複雑なものとなる。そのため当地域における水田の水収支機構を解明し、プログラムに組めるような算式で表示し、電子計算機による水管理の態勢作りも必要である。

この水稻2期作と地耐力の問題に関しては土壌物理をはじめ、水文、土木施工技術、水管理、農業機械、栽培、農業経済等多岐に亘る分野の総合研究が必要であり、先学のご教示を得られれば幸である。

土の濡れと撥水性

Wettability and Water-Repellency of Soils

宮 本 征 一

Seiichi Miyamoto

ま え が き

土の濡れと撥水性に関する研究は、近年までほぼ完全に無視されていた分野である。世界の各地で、水を吸収しないあるいはにくい土が見出されるようになって、土壌物理学の分野でも急にその研究が盛んとなった。又降水収集、浸入防止、有機質液体の地中処却等の工学的目的の一助として、関連した研究も進められている。本

資料は、上記のテーマに関する近年の研究成果を要約し基本となる事項を、Ⅰ. 問題と特性化、Ⅱ. 土壌水の保持及び土壌系の挙動に及ぼす影響、Ⅲ. 土壌水の動的状態に及ぼす影響及び応用の一部としてⅣ表面活性剤と不活性剤について紹介するものである。

そのⅠ 問題と特性化

Ⅰ. 撥水性土

土は、自然的、人為的な結果として、撥水性になる場合がある。自然的であると予想される撥水性土は、米国西部¹⁾⁸⁾⁹⁾¹³⁾、豪州⁴⁾、ニュージーランド、アフリカ、中近東等の乾燥、半乾燥地に、集中的に見出されている。撥水性にならないまでも、濡れが低下していると考えられる土は、湿潤地帯の土で有機物を多く含む砂質土の場合に見出されている¹⁴⁾¹⁵⁾²⁷⁾²⁹⁾。現段階では、調査が進んでいない為に、数量的な把握はできていないが、濡れが自然的に低下している土は、かなり広範囲に分布しているものと予想される。

自然的に撥水性になる原因は、未だ明確ではないが、ある種の有機物が土粒子表面を被覆することによると考えられている。ここでいう有機物は、単に土表面被覆植物の残留、投入有機物だけでなく、土壌微生物の生体及び死体が重要な要因として含まれている³⁾²⁶⁾。半ば人為的なものとして、山火事、又はヤブ火事の後に、地表面下に撥水性層が形成されることも報告されている⁶⁾⁷⁾。自然的に撥水性になった土は、高熱処理、過酸化水素処理等で、濡れが回復することから考えても、ある種の有機物(例えば Wax Resin 等)が土粒子表面を覆って、濡れを低下させていると考えてよからう。

土を工学的目的のために、人為的に撥水性にする努力

もなされている。特に、繊維の防水処理の研究とあいまって、多くの表面不活性剤が生産されるに至り、その一部は土に応用されている⁵⁾²²⁾²³⁾。又有機質液体あるいは汚水を、地中処却した場合にも、濡れの低下が予想される。

Ⅱ. 濡れと撥水性の指標及び決定法

土の濡れと撥水性という用語は、概念的なもので、研究者によって様々な意味に解釈されている。本報では、各種の液体が、大気圧の下で乾いた土粒子と接触した時に示す濡れやすさの程度を、濡れ性(Wettability)と呼び、特に水に注目した場合の非濡れの程度を、撥水性(Water-Repellency)と呼ぶことにする。この概念によれば、濡れ性は、土粒子間の距離(空間構造)とは無関係で、土粒子表面の性質(表面構造及び表面エネルギー状態)と液体の性質だけによって、定まるべきものである。土粒子間の空隙を小さくして、液体の浸入、移動を防ぐ止水とは、基本的に概念を異にすることは、言うまでもない。

1. 液滴の浸入度合

乾いた土の表面に液滴を落とし、ある定めた時間内に浸入するか否か、あるいは浸入に要する時間を以って、濡れ性の指標とするものである。上述した濡れ性の定義によればこの指標は、必ずしも濡れ性そのものを表わすものではなく、土の空間構造、土表面の凹凸、等の影響を受けると、考えるべきである。

(1) 水滴法: 液滴として水滴を用いる場合で、土が撥

* Dept. of Soil Science & Agr. Engi. University of Calif. Riverside.

現住所 Dept of Soil, Water & Engineering. University of Arizona, Tucson. (1971. 8.19受理)

水性であるか否かを、簡便に判定するに便利である。撥水性は一般に不安定であり、最初水滴は浸入しなくても、ある時間後に、急に浸入することがある（土中有機物が、水中に溶解し、水の表面張力を低下させることが主要因と思われる）。この浸入までの時間を測定して、撥水性の安定性の指標とする。

(2) エタノール水溶液法：撥水性のより細かい程度を表わすために、Watson と Letey²⁸⁾ は、濃度の異なるエタノール水溶液の液滴（表面張力も結果として異なる）を用いることを提案している。水滴法の場合と同様に、エタノール溶液の液滴を土表面に落下させ、定めた時間（例えば5秒内）内に、浸入が始まる時の溶液の表面張力（ σ_L^d ）を以って、撥水性の指標とする。 σ_L^d が小さい程、撥水性が強くなる。

(3) 純液法：濡れ性は、土粒子の表面張力（ σ_s ）と液体の表面張力（ σ_L ）のバランスによって規定されるとする仮定をもとに、Miyamoto と Letey¹⁹⁾ は、 σ_s を土粒子側固有の撥水性の指標として用いることを提案している。（詳しくは、表面張力法の項参照のこと。）近似的に σ_s を求めるに当っては、エタノール水溶液の代りに表面張力の異なる各種の化学的に不活性な純粋液体を用いて σ_L^d を求め、その¹/₄として σ_s を決定する。（水溶液の場合には、溶質の吸着が起り、みかけ上小さな σ_s を与える）こうして求められた σ_s は、土壌固有の撥水性の指標として用いられるだけでなく（ σ_s が小さくなると撥水性が強くなる）、後述する理論式を用いて、異なる σ_s を有する液体に対する濡れ性を推定するのに役立つ。

2 前進接触角

土中に毛管束を仮定し、毛管上昇式に含まれる接触角を、濡れと撥水性の指標として用いる。ここでいう接触角は、乾いた土へ液体が浸入する過程で形成される意味から、前進接触角と呼ばれる。更に土中においては、みかけ上の相対的な値と考えねばならない。何故なら、土粒子の表面及び空間構造は、不規則であり、接触角は明確な幾何学的意味を持ち得ない。又直接測定は不可能であるから、接触角ゼロを与えると仮定される基準との相対値として決定される。測定法は、大別して平衡法と動的法的に別けられるが、ここではその代表的な方法を紹介する。

(1) 比較土柱法：Letey¹⁷⁾ らによって提案された方法で、土に毛管上昇式を導入し、接触角ゼロを与えると仮定された基準液体との相対的な値として、前進接触角（ α ）を決定する。

$$\cos \alpha = \frac{h \rho \sigma_L \sigma_o}{h_o \rho_o \sigma_L} \quad (\text{I}-1)$$

ここに、 h ：自由水面から、浸潤前線までの高さで、上向きを正の値とする。（cm）。 ρ ：液体の密度（gr/cm³）

σ_o ：基準状態を表わす添字である。測定においては、基準土柱と測定土柱は、同じ空間構造を与えるよう、密度その他試料つめ込みの手順を同一にする必要がある。基準液体としては、表面張力の低い Hexane Ethanol 等が用いられる。試料を高熱処理して基準状態として用いる方法もある¹⁰⁾が、熱処理による構造変化が予想される。いずれの方法においても、基準状態が本当に接触角ゼロを与えるという保証はない。 h の測定は、通常24時間後に行なわれる。正の h が生じない場合、理論的には、正圧を加えて h を測定すればよい訳であるが、実際上壁面と試料との間を液体が通り抜け測定は困難である。このような場合は、特別な装置を開発する必要があり Fink ら¹¹⁾の方法は、その一例である。濡れの状態でも、壁面は、表面不活性剤（例えば Octa decyl-chlorosilane 等）で処理する必要がある。

(2) 比較浸入速度法：鉛直浸入¹⁷⁾、横浸入¹²⁾及び上昇浸入¹⁰⁾を用いる場合があるが、ここでは、条件がうるさくない横浸入の場合を紹介する。比較土柱法の場合と同様に、土に毛管束を仮定し、Poiseuilles 式から次式が得られる。

$$\cos \alpha = \left(\frac{L/\sqrt{t}}{L_o/\sqrt{t}} \right)^2 \left(\frac{\sigma_L \sigma_o \eta}{\sigma_L \eta_o} \right) \quad (\text{I}-2)$$

ここに、 L ：浸入距離、 t ：浸入時間、 η ：粘性係数である。 L/\sqrt{t} は、適当な t ごとに L を測定し、 L と \sqrt{t} のプロットから、その勾配として求められる。 L と \sqrt{t} のプロットは、浸入源の圧力によって変り、Niej sen ら²⁴⁾ によって、 -2 mill-bar の圧力が適当とされている。有効測定域は、濡れの場合に限られる。求められる α の性質は、比較土柱法と同様、基準液体を用いるので、みかけ上の相対接触角と考えられる。

(3) 熱力学的方法：潤熱の測定、あるいは吸着等温線の測定から、熱力学の関係式を用いて、 α を決定する方法は、平面固体の場合にかなり用いられている。土においては、Miyamoto ら²⁰⁾ によって、吸着法を使うことは困難であると報告されている。潤熱を用いる方法は、表面張力に加えて、他の多くの要因が測定値に影響することから考え、土の濡れの程度を表わすには、不適当であると予想される。

3 土粒子の表面張力と前進展散係数

Miyamoto と Lefey¹⁹⁾ は、風乾土粒子の表面に張力 σ_s を仮定し、濡れを規定する土粒子固有のパラメーターとして用いることを提案している。 σ_s は、土粒子表面が完全平面である場合の表面エネルギーに表面構造の影響を含めたみかけ上の張力である。濡れ性は、基本的に σ_s 、 σ_L 及び液相と固相間の界面張力 σ_{sL} のバランスによって定まると仮定し、その指標を展散係数 S と呼び

$(\sigma_s - \sigma_{sL} - \sigma_L) / \sigma_L$ と定義する。 σ_{sL} は、純粋液体の場合には、Fowkes の式によって $\sigma_s + \sigma_L - 2\sqrt{\sigma_s \sigma_L}$ と表わせるので、結果的に S は、 σ_s と σ_L だけの関数として、次のごとく表わされる。

$$S = 2\sqrt{\sigma_s / \sigma_L} - 2 \quad (I-3)$$

接触角は、 $\cos \alpha = (\sigma_s - \sigma_{sL}) / \sigma_L$ と定義されているので、 S との間に、 $S = \cos \alpha - 1$ の関係を有する。但しこの関係は、 $\sigma_s > \sigma_L$ の場合には意味をなさない (S は、正の値を取り、液体は固体の表面張力に引っぱられて展散する)。 σ_s が σ_L に等しい時、 α 及び S はゼロとなり、完全濡れの状態となる。

$\sigma_s < \sigma_L$ の時、 α は、定まった値を持ち、接触角濡れの状態となる。土の場合、 $\sigma_s \leq \sigma_L / 4$ の時に $\alpha = 90^\circ$ となり、圧力をかけない限り、液体は浸入しない。今 σ_s の値が求まれば、 S は、与えられた液体について(3)式から容易に求められる。

Miyamoto と Letey¹⁹⁾ は、 σ_s を求める二つの方法を提案している。一つは、前述した純液法で、液滴がまさに浸入を始める時を $S = -1$ (つまり $\alpha = 90^\circ$) と定め、(3)式によって、 σ_s を σ_L の $1/4$ として決定する。こうして求められる σ_s の性質は、前述した通りである。

上記の方法は、撥水性土の場合のみ適用できるもので、より一般的な方法として、彼等は表面張力法を提案している。比較土柱法の場合と同様に、土中に毛管束を仮定し、 σ_s と σ_{sL} の差が、液体をつり上げているとして、次式から、図式的に σ_s を決定する。

$$\frac{\rho h}{\sigma_L} = \left(\frac{4\sqrt{\sigma_s}}{gr} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\sigma_L}} - \frac{2}{gr} \quad (I-4)$$

ここに g : 重力の加速度 (cm/sec²), r : 仮想毛管の有効半径である。上式は、 σ_s が σ_L よりも小さい場合に限られるので ($\sigma_s > \sigma_L$ の場合液体は、 r にかかわらず展散する)、表面張力の比較的大きい液体を用いて、 h を比較土柱法の場合と同様に測定し、 $\rho h / \sigma_L$ と $1 / \sqrt{\sigma_L}$ のプロットの勾配と切片から、 σ_s が求められる。より簡便な方法としては、比較土柱法で α を求め (I-3) 式の S と σ_L を既知数として σ_s を概算してもよい。

III. 決定法間の比較

決定法の原理的な違いは、前述した通りである。細かい比較は、実際のデータをもとに考察する。表 I-1 は 5 種類の風乾土試料について、 σ_s 及び S を求めたものである (比較法のデータは、 $S = \cos \alpha - 1$ の式によって計算したものである)。

純液法と他の方法を比較した場合、純液法は、小さい S を与える傾向にある。他の方法においては、水が土中

表 I-1 風乾土粒子の平均表面張力、 σ_s 、及び水に対する前進展散係数 S

試料	σ_s (dyne/cm)	純液法		Hexane 表面張力法	比較土柱 法 Ethanol	比較浸入 速度法 Ethanol
		*1	*2			
粗砂	42.0	—	-0.47	-0.55	-0.50	-0.49
Pachappa 砂壤土	39.6	—	-0.52	-0.63	-0.51	-0.61
Glendora 撥水性土	23.1	-1.02	-0.86	-0.91	-0.87	—
Baywood 撥水性砂	25.0	-1.02	-0.82	-0.92	-0.90	—
Silane 処理砂	11.1	-1.25	-1.25	—	—	—

*1 表面張力法により求めたもので実験誤差 ± 2.5 dyne/cm

*2 測定原理または方法により測定不可能

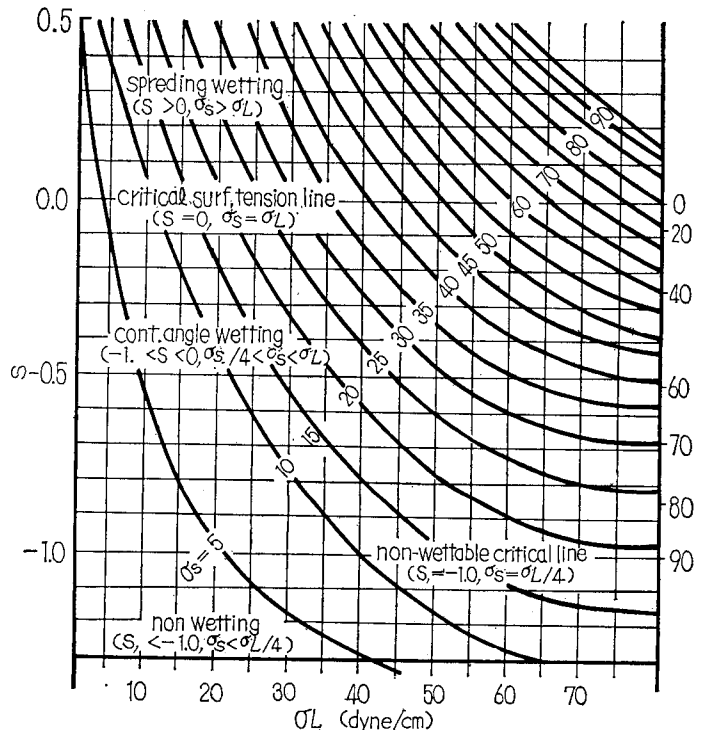


図 I-1 濡れと撥水性の特性化

σ_s : 土粒子の表面張力 (dyne/cm), σ_L : 液体の表面張力 (dyne/cm), S : 前進展散係数 (Miyamoto と Letey¹⁹⁾ による)

に長く存在している間に σ_L が低下したこと、及び純液法において、土の表面の凹凸の影響が出ること等がこの相違の主要な原因と思われる。表面張力法は、逆に最も大きな S を与える傾向にある。比較法が、表面張力法に比べ小さな S を与えるのは、基準液体が、不完全ながら展散した為であると思われる。比較没入法のデータは、少なく評価できないが、Mustafa ら²¹⁾ の実験データは、比較土柱法と近い値を与えている。上記のデータに関する限り、液滴法と他の方法に大きな差がみられるが、他は実用性を防げない範囲で似かよった値を与える。決定法の選択は、用いる目的、測定範囲、測定原理によって決めることは言うまでもない。

IV. 濡れと撥水性の特性化

濡れと撥水性に関する基本的な概念は、土粒子の表面

の性質と用いる液体の性質によって決るとするものであった。この概念は、(I-3) 式に具体化されていると言えよう。読者の便を計って、この関係を図示している。

σ_s は、土粒子側固有の張力で、その低下は濡れ性を低下させる。 σ_L は液体側固有の張力で、その低下は、濡れ性を向上させる。 S 及び α は、 σ_s と σ_L のバランスによって決り、濡れの状態を表わす指標である。またこの図は、希望する濡れの状態を得るために必要な、 σ_s と σ_L の修正を概算するのにも役立つ。

σ_s , S に及ぼす空間構造、温度、時間等の影響は、必要に応じて検討さるべき問題である。又表面活性剤のように吸着性を有する液体の場合、液体が上中にはいると同時に σ_L , σ_{sL} が変わるので、図 I-1 は直接には適用できない。

そのII 土壤水の保持、及び土壌系の挙動に及ぼす影響

I 土壤水の保持に及ぼす影響

1 毛管未飽和域の保持

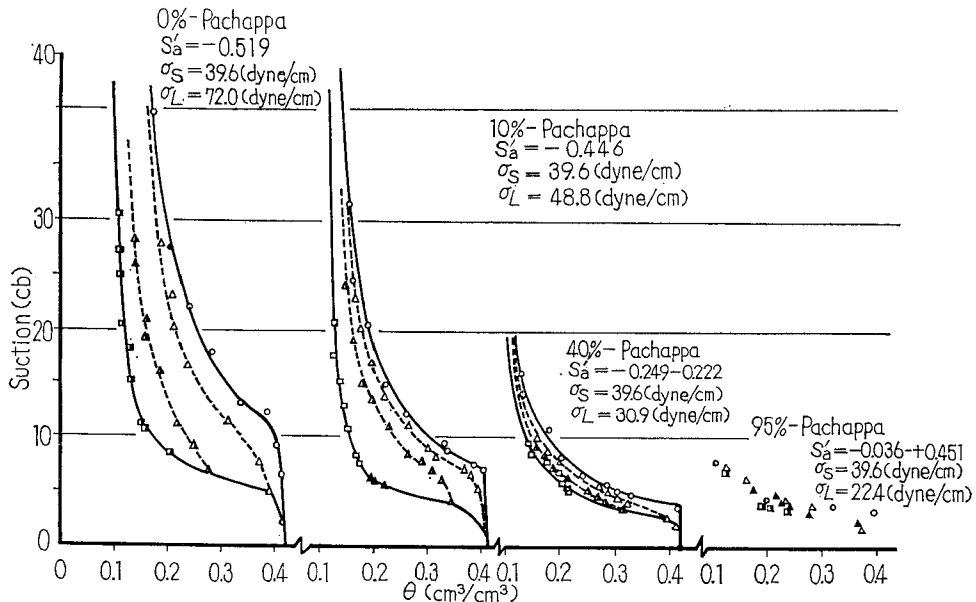
未飽和域の水分保持は、含水量と負圧を似って特性化される。両者の関係は、一般に保持力曲線と呼ばれるが、この関係は必ずしもユニークなものではなく、プロセスと初期の状態によって異なり、ヒステレシスを伴う。

従来から、保持力及びヒステレシスを規定するものは

土の空孔の幾何学性(大きさや形状)によるものとされてきた。ところがそのIで紹介したように、土と液体の表面張力が異なる場合には、この影響を加味しなければならない。今土中に、半径が異なる微小毛管柱空孔を仮定し、 i 番目の空孔の負圧、 τ_i を定義すると、

$$\tau_{ai} = \frac{2\sigma_i(S+1)}{r_{ai}} \quad (\text{前進濡れの場合}) \tag{II-1}$$

$$\tau_{ri} = \frac{2\sigma_L}{r_{ai}} \quad (\text{後退濡れの場合}) \tag{II-2}$$



図II-1 液体の表面張力 (σ_L) 及び前進展散係数 (S) が水分保持曲線に及ぼす影響 θ : 体積含水比, τ : 負圧

$$\tau_{ri} - \tau_{ai} = 2 \sigma_L \left(\frac{\tau_{ai} - \tau_{ri}(S+1)}{\gamma_{ai} \gamma_{ri}} \right)$$

(ヒステレシスの場合) (II-3)

ここに r は仮想毛管半径で、前進濡れの場合、 r_a なる有効半径、後退濡れの場合 r_r なる有効半径を有する。 $(r_a > r_r)$ である、 τ_{ai} 及び τ_{ri} はおのおの前進、後退濡れの負圧である。

上式によって、 σ_L の減少は、後退濡れの保持力及びヒステレシスを減少させることが予想される。又 σ_L の減少は、前進濡れの場合に、 S の増加を伴うので、 S がある正の値を有する時点で、ヒステレシスは消滅する。逆に σ_s の減少は、 S の減少をとめないヒステレシスを増加させる。

図 II-1 は、Miyamoto らの未発表データの一部を引用したものである。試料は Pachappa 砂壤土で、液体としてエタノール水溶液が用いられている (図中の百分率は、体積百分率)。保持力曲線は、鉛直浸入法にて求められたもので、実線は最大最小、点線は後退ヒステレシス曲線である。

図 II-1 のデータは、上述した予想をほぼ満足させていると考えてよからう。紙面の都合でかかげていないが、撥水性土の場合も、ほぼ同様な傾向が得られ、ヒステレシスは、 S が正の値で無規できるものとなる。多くの有機質液体は、表面張力が低く (30 dyne/cm 程度) そのヒステレシスは、無視できるものと思われる。逆に水は、我々が通常取扱う液体の中で、例外的に大きい表面張力を有するので、大きな保持、ヒステレシスは、水特有のものと考えられる。

土の構造が、用いた液体によって変化しない (II-1)、(II-2) 式において、 r_{ai} と r_{ri} が、用いた液体に関係なく、一定の分布を保つと仮定するならば、 σ_L の変化による最大最小保持力曲線の一つの実験データから推定できるはずである。即ち、最小保持力曲線の場合、 $\sigma_L (S+1)$ 、最大保持力曲線の場合、 σ_L の比に応じて、 τ が変化する。事実この定量的な推定は、かかげたデータの場合、使いものになる近似を与える。

最大、最小曲線のループから、内部のヒステレシス曲線を推定する方法が、Philip¹⁴⁾ によって提案されている。Topp¹⁶⁾ によって示されたように独立ドメインモデルは必ずしも、近年 Poulouvassilis¹⁵⁾ 土壌には適用できないので、このモデルを基礎にしている Philip の解析には限界がある。濡れ性が、前進濡れの場合と、後退濡れの場合の保持に違った影響を与えることは、独立ドメインモデルがくずれる一つの要因となる。

2 吸着域の保持

固体の表面に、水滴が一定の接触角を有して存在するためには、固体による蒸気吸着に一定の限界がなければ

ならない。このことは事実平面固体においては、実測されている¹⁾。各種の土試料において、Miyamoto¹¹⁾ らは、次のような吸着等温線を求めている。

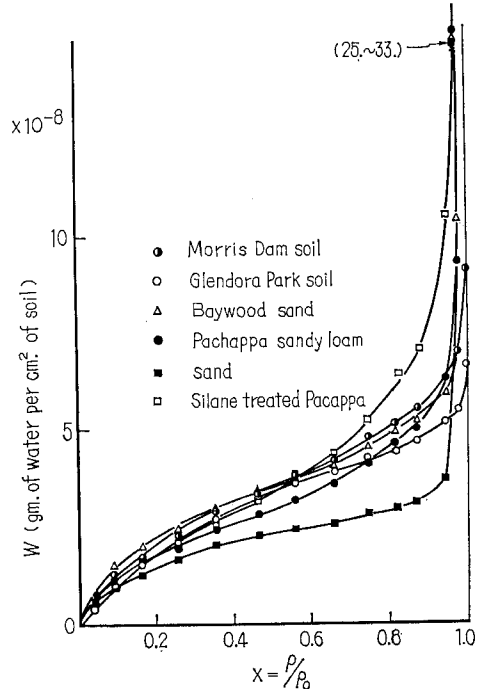


図 II-2 撥水性土による水蒸気の吸着、 x : 比蒸気圧、 w : 単位面積当りの吸着量、温度 $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ Pachappa 及び sand を除いて他は撥水性土 (Miyamoto ら¹¹⁾ による)

吸着量の絶対量は、表面積測定時の誤差がかなり大きいので、信頼性とほしいが、その増加の傾向は、正しいと考えられる。図に示されるように、Glendora park soil と Morris Dam soil は、飽和蒸気圧の下で、一定の吸着量を有するが、他は撥水性土の場合でも吸着量が急増している。粉体の場合に、撥水性は水分子吸着には影響しないのか、あるいは他の要因が (恐らく土の毛管構造)、その影響をかくしてしまうかのいずれかであろうと予想される。

3 飽和域の保持容量及びタン水支持圧

完全に飽和状態であれば、表面エネルギーの影響は、消失する。一般に濡れが低下している場合は、見かけ上の飽和量が小さくなる傾向にある。これは、土粒子表面及び液相中に、封入空気が増加するためと思われる。

タン水支持圧は、撥水性の場合 ($S < -1.0$) に定義される。

$$H = - \frac{2 \sigma_L (S+1)}{\rho g r} \tag{II-4}$$

ここに H : タン水支持水頭である。上式から明らかのように、 σ_L の増加、 S の減少は、 H を増加させる。Fink

と Myers⁵⁾ が、Silicon 系の化合物で土を処理し (σ_s を減少させ、結果として S が減少する) H を求めたデータによれば、約 1 m 程の許容タン水深が砂壤土で得られている。もちろんこの値は、時間とともに減少する可能性がある。

II. 土壌系の物理性に及ぼす影響

1 付着

液相と固相を付着させる時の可逆の仕事 W_a は、平面体の場合に、 $W_a = \sigma_s + \sigma_L - \sigma_{sL}$ と定義される。 $(\sigma_{sL}$ は液体と固体の界面張力) その I で紹介した前進展散係数 S 、と組合せると

$$W_a = p\sigma_L (S + 2) \quad (\text{II-4})$$

$$\text{または} = 2p\sqrt{\sigma_s \sigma_L} \quad (\text{II-5})$$

と書くこともできる。ここに p は構造が平面からずれるための補正係数。実際に付着を規定する要因は多様であり、上式は単に、表面張力の影響を定性的に解釈する便宜上の式に過ぎない。他の要因が同一である場合には、 σ_s 、 σ_L 及び S の低下は、付着の低下をきたすはずである。ただ注意すべきは、その影響の傾向には、ヒステリシスが含まれる可能性があることである。前進濡れの状態では、(II-4) (II-5) 式のように σ_s 、 σ_L の平方根として W_a が影響を受けるが、後退濡れの状態における付着は、 S が -1.0 よりも大きい領域 (濡れの領域) の時に S が近似的に 0.0 になるため ((II-2) 式参照) σ_L の影響は線型として、 σ_s の影響はゼロとなる可能性がある。

σ_s の異なる物体に対する土壌の付着力を測定した秋山¹⁷⁾ の報告を図 II-3 に引用する。

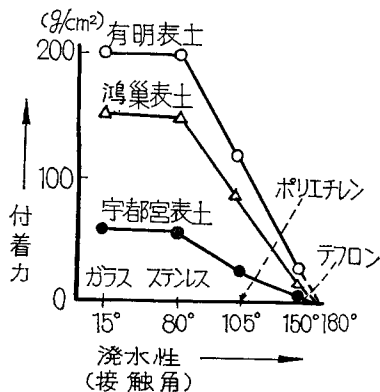


図 II-3

接触角 α は、その I で示したように $S = \cos \alpha - 1$ の関係にあるので、上図は、 α が 80° よりも大きな領域で (II-4) 式の予想と大体一致することを示している。 α が 80° 程度以下で、付着力がほぼ一定になる現象は、測定が後退濡れの状態でなされたためか、あるいは W_a は

付着力に付着距離を乗じたものであるから、付着距離にかかわる何かが $\alpha = 80^\circ$ か 90° あたりで急変したためと予想される。

σ_L を低下させるに従って付着力が減少する現象は、Fountain⁶⁾ が、カーボナダムに水、Nitrobenzen, Alcohol を加えて付着力を測定した結果からも明らかである。後退濡れの場合に測定される付着力は前述したように σ_L と線型の状態で減少すると予想される。事実彼の実験データは $\sqrt{\sigma_L}$ よりも σ_L に比例して付着力が減少することを示している。現段階では、付着と濡れ性の関係についての研究は少なく今後の研究に待たねばならない。

2 分散

付着の仕事が小さいということは、分散するのは容易であると考えられる。従って σ_L 及び σ_s の低下は、分散を容易にすると予想される。この場合も、ヒステリシスをともなうべきで、濡れの領域の後退濡れの場合 σ_s は、分散には余り関係せず σ_L の影響が支配的であると予想される。

Mustafa と Letey¹²⁾ が、非イオン性表面活性剤 (Alkyl polyoxy ethylene ethanol, 及び 50% polyoxyethylene esters of cyclic acid 50% polyoxyethylene ethers of alkylated phenols の重合体) を水に加えて (水の σ_L を低下させる) ピペット法によって土粒子の分散度を測定したデータによれば、活性剤濃度が大きくなるに従って、分散が大きくなることを示している。同じ表面活性剤を水に添加して、飽和透水係数を測定した Watson¹⁷⁾ のデータは、濃度の増加に伴って透水が悪化することを示している。上記のような状態での土粒子の分散は、他の要因、特に溶解及び交換性イオンの影響を受けるので、 σ_L の影響とは断定できないが、II-4 式で予想されるように σ_L の低下は一般に分散を増加させる傾向にあると考えてよいであろう。

3 団粒の安定と沸化現象

乾いた団粒土に液体が急速に浸入する時に土の構造が崩壊する現象は、通常沸化現象と呼ばれ、自然界における団粒構造破壊の大きな要因であると考えられている。濡れの低下が、沸化を低下させ団粒の安定に役立つであろうとする論議は、土壌有機物が団粒安定に役立つ原因の一つとして極めて古くからなされている⁷⁾。その I で述べたように、有機物の存在は、多かれ少なかれ土粒子の表面張力を低下させ結果として濡れを低下させる。濡れが低下することは、急速な水の浸入を妨げ、沸化の力を低下させ団粒の安定に役立つとする論議である。残念ながら、濡れの低下がどれ程団粒安定に役立つかを示すデータは提示されていない。極端な側として、濡れが生じ

ない場合は、水が土中に浸入しないで沸化は起らないことになる。 σ_s の低下は、沸化を限定すると予想される。当然ながら σ_s を低下させただけで、団粒の安定が保証されるというものではなく、基本的に土粒子をバインドする力の存在が前提となる。

III. 土壌系の力学性に及ぼす影響

1 耐圧強度

同一の土の構造及び水分量の下で、付着力が大きいく程耐圧強度は大きくなると仮定するならば、(II-4)式によって σ_s 、 σ_L の低下は、耐圧強度の低下を伴わなければならない。水を含んだ土の場合、ガソリンを含んだ同一の土に比べ強度が大であることは、通常観測されることである。Brandt⁴⁾は、同一の水分量の下で、 σ_s を低下させる表面不活性剤を加えた土は、加えない土に比べ、若干強度が低下することを報告している。

耐圧強度が、水分量の増加に伴って減少することは良く知られている現象である。 σ_s の低下は、前進濡れを減少させるので、水中に土試料をひたした状態で耐圧強度を測定するならば、強度の増加を期待できるはずである。Hemwall⁹⁾らは、4-t-butylcatecholを用いて、土の σ_s

を低下させ、水中にて土の強度を測定し、著しい強度の増加を報告している。強度の増加は、吸収した水分量の違いによってもたらされたものと考えられる。湿潤地における路床の安定工法の一助として、今後研究される必要があるだろう。

2 つきかため密度

付着力の低下は、外力を加えた場合の土の変型を容易にすると仮定するならば、 σ_s 、 σ_L の低下は、つきかため密度を増加させるはずである。Brandt⁴⁾は、4-t-butylcatecholを土に加え σ_s を低下させ、つきかため試験を行ない密度の向上を報告している。 σ_s の低い土では、一度乾燥した後には、水の浸入が悪く、逆につきかたまりにくくなる。

σ_L を低下させた場合のつきかため密度に及ぼす影響を確かめたデータは現段階では見当たらない。 σ_s の低い土の場合、 σ_L を低下すれば容易に水を浸入させることができるので、つきかため密度の高上が期待される。

土の濡れと撥水性が、土壌系の挙動に及ぼす影響は、未だ解決されていない問題が多い。工学的目的の実用性を考える場合に、一考するべき課題であろう。

そのIII 土壌水の動的状態に及ぼす影響

1 浸入能

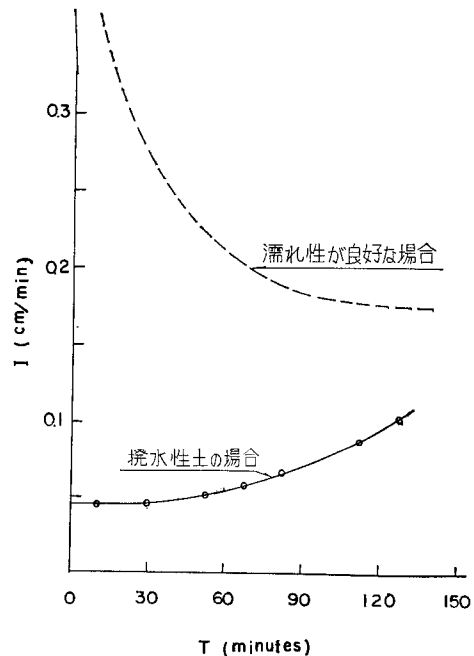
Leteyら¹²⁾は、土に土管束を仮定し、浸入能を表わす次式を提案している。

$$I = 2 K \sigma_L (S+1) / L + K r \rho g (d+L) / L \quad (\text{III-1})$$

$$K = \left(\frac{\theta r}{8 \eta} \right)$$

ここに I : 浸入能 ($\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$)、 σ_L : 液体の表面張力 (dyne/cm)、 S : 前進展散係数、 L : 浸入深さ (cm)、 d : タン水深 (cm)、 ρ : 液体の密度 (gr/cm^3)、 g : 重力の加速度 (cm/sec^2)、 r : 仮想毛管半径 (cm)、 θ : 含水比 (cm^3/cm^3)、 η : 液体の粘性係数 (poise) である。

I は、時間(又は L)と共に減少することは良く知られ、均一土層においては、図III-1に示されるように指数関数の型で減少するのが普通である。所が S が -1.0 以下(非濡れの状態)の場合に、タン水深 d を加えて浸入させると図に示されるように、 I は時間と共に増加する。上式において、 K は一定と考えられるので、第一項(表面エネルギーに関係する)が負となって、第二項(重力に関係する)による浸入を妨げるが、時間がたつに従って L が増加し、この負の影響は小さくなる。最終的に、第一項の影響は消失し、第二項は一定値に落ち着く(この値は、透水係数に等しくなる)。一般に S が小さくなる(濡れ性が低下する)に従って、初期浸入能が低下



図III-1 濡れと撥水性が浸入能の時間的変化に及ぼす影響。T: 時間, I: 浸入能, (Leteyら¹²⁾による)

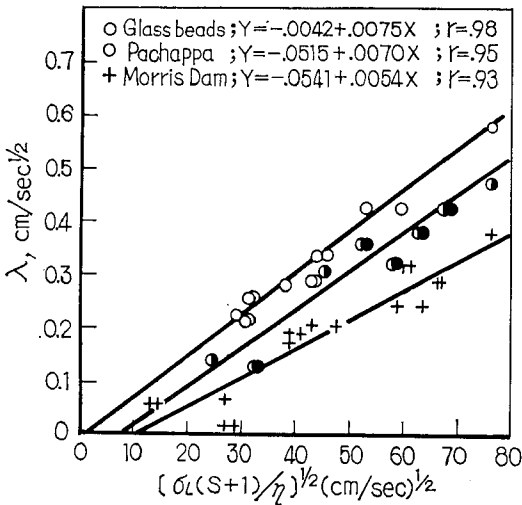
する。実際には、 S が -1.0 以上の場合でも、 I が時間と共に増加することがある。これは、 σ_L 、 S 及び θ が時間と共に増加する理由による場合が多い。

2 横浸入度

土の毛管力だけによって、液体が横方向に浸入する場合は、(III-1)式の第一項だけが関与する。 I は、水が均一に浸入している場合、 dL/dt に等しいので、(III-1)式の二項を無視して積分すると次式が得られる。

$$\frac{L}{\sqrt{t}} = \left\{ \frac{\theta r \sigma_L (S+1)}{2 \eta} \right\}^{1/2} \quad (III-2)$$

L/\sqrt{t} は、一般に横浸速度(λ)と呼ばれる。(あるいは、 $\lambda = L/\sqrt{t}$ の式は、未飽和流の拡散方程式解の場合に用いられる Boltzman 変換式としても知られている。)与えられた土において、違った液体を用いて求められる λ は、 $\{\sigma_L(S+1)/\eta\}^{1/2}$ との間に線型の関係有すべきである。Mustafaら¹⁵⁾が3種類の試料に、各種の有機質液体を用いて求めたデータを図III-2に示す。



図III-2 横浸入度 λ に及ぼす液体の性質、(表面張力 σ_L 前進展散係数 S 、粘性係数 η) の影響 (Mustafa ら¹⁵⁾による)

図から明らかなように、実用性を妨げない範囲で、良好な線型関係が得られる。 λ を一つの液体について求めておけば、他の液体について λ を推定できるという意味で、非常に便利な関係式である。

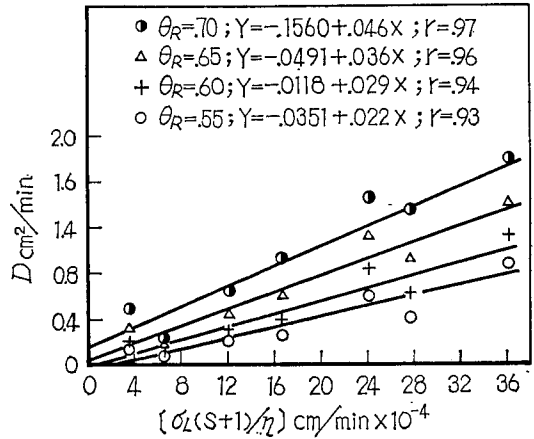
3 土壌水の拡散度

横浸入の場合と同じ条件の下で、Philip²⁵⁾は、表面張力を加味した次のような土壌水分拡散方程式を提案している。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma_L (S+1)}{\eta} D_o(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (III-3)$$

ここに x : 横方向の距離、 $D_o(\theta)$ は、土特有の拡散係数で距離の次元を持つ。測定される拡散度 $D(\theta)$ は、

$\sigma_L(S+1)/\eta$ との間に線型の関係を持つ。Mustafaら¹⁵⁾が pachappa 砂壤土を用いて、各種の有機質液体の場合に求めたデータを、図III-3にかかげる。



図III-3 土壌水拡散度に及ぼす液体の性質 (表面張力 σ_L 、前進展散係数 S 、粘性係数 η) の影響 (Mustafa ら¹⁵⁾による)。($\theta_R = (\theta - \theta_i) / (\theta_s - \theta_i)$)

図から明らかなように、良好な線型関係が得られるので、一つの液体について $D(\theta)$ を測定しておけば、他の液体の $D(\theta)$ を近似的に推定できる。

4 透水性

Darcy 則で定義される透水性 K は、液体の ρ 、 η によって影響を受けるが、 σ_L 及び S によっては変るべきでない。即ち前述した III-1 式において、 L が大になった場合、 I は、第二項だけの影響を受け、Darcy の見かけ上の流速に等しくなる。物理的には、飽和流の場合、蒸気相との界面は消失し、結果として、流れの状態に関与しないと考えることもできる。

未飽和透水係数の場合も、全く同様なことが言える。未飽和流の一般微分方程式から、 $K(\theta)$ は、 $-D(\theta)(\partial \theta / \partial H)$ と定義される。(H は負の水頭で正の数として扱っている)。(III-3) 式から $D(\theta)$ は $D_o(\theta) [\sigma_L(S+1)/\eta]$ 及びその II で紹介したように、 H は $[2 \sigma_L(S+1)] / \rho g r$ と仮定されるので結局 $\sigma_L(S+1)$ の影響は、相殺されてしまい $K(\theta)$ は、 ρ 、 η 、及び土固有の保持係数だけによって影響を受ける。(但しこの論議は、砂のように構造が安定した場合に適用できるもので、実際には $K(\theta)$ は、流体の化学的、生物学的性質によって変化する。)

5 水分分布

乾いた土への横浸入、あるいは鉛直浸入時における水分分布を、時間と距離の関数として解析的に求める方法は、Klute¹⁰⁾ 以来多くの研究と改良がなされてきた。前述した (III-3) 式によって、 σ_L 、 η 、 ρ の違った液体を用いた場合 $D(\theta)$ が変ることを知っているの、その D

(θ) と $H(\theta)$ のデータを用いて(III-3)式を $\theta(x, t)$ について解くことになる。水分分布は、 x についてほぼ均一に分布し、浸潤前線にて急に初期水分量に落着くパターンをとるので、 t について分布を概算する場合、(III-2)式にて見当をつけることができる。

浸入後の水分分布を解析的に求める努力は Staple²⁶⁾ Rubins²⁷⁾ 等によってなされているが、ヒステレシスの影響が出るため、その解法は、めんどうとなる。特に濡れが低下した土の場合、分布は、鉛直的、水平的に不均一となり、数値的な取扱いは非常にむずかしい。

6 蒸 発

土壌面からの蒸発は、土壌水ポテンシャルが -15har よりも大きい場合、外的な気象条件によって規定され土側の影響は無視できると考えられている。何故なら、 -15bar までは、蒸気圧はほぼ飽和に近く、蒸発を限定す

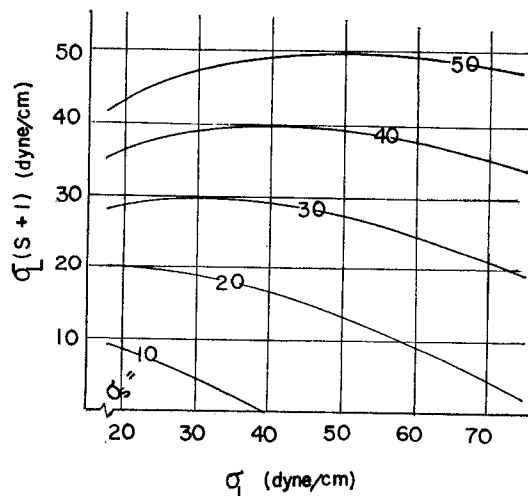
るとは考えられない。所が撥水性土、あるいは濡れが低下した土を飽和した後に、蒸発させると、 -15har 以上で蒸発が減少し、濡れやすい土に比べ蒸発が少くなる傾向にある。原因は、自己マルチング作用によるものと考えられる。

現時点では、詳しい研究報告はまだなされていないが上記の現象は、従来考えられていたリング水としての移動が大きな負圧の下でも永續しているとする考えに反する意味で興味深い。土粒子の表面張力が土ごとに違うことから考え、液相としての移動の限界は、土ごとに変わり、一定の負圧で定義はできない。一般に σ_s が小さくなるにつれ液相としての移動は低下し、蒸気相としての移動の相対的量が增多すると予想される。マルチングに関する新しい考え方として、今後の研究の進展が期待される。

そのIV 表面活性剤と不活性剤

前述した式中には、いずれも $\sigma_L(S+1)$ の項が含まれている。又最初に述べたように $S = 2\sqrt{\sigma_s/\sigma_L} - 2$ であるから基本的に σ_L と σ_s を変えることによって、土壌水の動的状態を変化させ得ることになる。 σ_L を低下させる化合物を表面活性剤、 σ_s を低下させるものは表面不活性剤と通称されている。(正確には、両者とも、 σ_{sL} をも変えている。) σ_s と σ_L の組合せで $\sigma_L(S+1)$ がどのように変わるかを示したものが図IV-1である。表面活性剤を用いる場合、吸着が起り $\sigma_L(S+1)$ はこの図に示されるよりも若干小さくなる。

今浸入、拡散度を増加させようとするならば、 $\sigma_L(S+1)$ が大きくなるように σ_L を σ_s に近づけてやればよ



図IV-1 液体の表面張力 σ_L 、土粒子の表面張力 σ_s と土壌水の動きを規定する項 $\sigma_L(S+1)$ との関係

い。 σ_s の高い土では、水の σ_L (72 dyne/cm 程度) を少し低下させれば、浸入、拡散を増加させることができるが、その高上の率は、余り高くなく、 σ_L を下げすぎると逆効果を生じる。(一般の濡れやすい土で、表面張力は、 40 dyne/cm 前後である)、 σ_s の低い土では、 σ_L を低下させると、かなり大きな増加が期待できるが、最大値は σ_s によって限界がある。(一般に自然に発生している撥水性土の σ_s は 20 dyne/cm 前後である)

現在数多くの表面活性剤が市場に出ている¹⁾ が土壌に用いる目的で市販されているもので代表的なものは、非イオン性の Alkylpolyoxy-ethylene ethanol, polyoxyethylene ester of fall oil, polyoxyethylene esters of cyclic acid +50% polyoxyethylene ethers of alkylated phenols 等であろう。又生産費が比較的安いアニオン系のものとしては、Alkyl naphtalene sodium sulfonate 等が利用されている。比較的低濃度 (500 ppm 程度) で浸入能の増加²³⁾、表面浸食防止¹⁹⁾、発芽²⁰⁾の促進等に効果があると報告されている。又作物に有害になる⁵⁾²¹⁾²²⁾場合、土壌構造を破壊する傾向にある³⁰⁾等の報告もあるので、利用に当っては、化学的・生物的副作用を試験する必要がある。

水の動きを制限しようとする場合には、図IV-1から明らかなように、 σ_s を低下させることが最も有効である。この目的のために多くの表面不活性剤が市販されている⁷⁾⁸⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。4-tert-butyl pyrocatechol, Sodium methyl silanolate, dialkyl quaternary Ammonium chloride, sodium resinolate 等は代表的なものである。水の浸入防止、法面の安定、マルチングその他工学的目的で今後の研究が期待される。

θ_s を高くすることは、現段階では、実用に至っていない。

おわりに

土の濡れと撥水性は、基本的に液体の表面張力、土粒子の表面張力及びそのバランスによって規定されるとする観点から、その決定法、及び土壤水の静的、動的状態に及ぼす影響について基本となる事項を紹介した。土に対するより深い理解、あるいは、撥水性土の管理、浸入制御、土壤安定等の応用の一助となれば、はなはだ幸いである。尚この資料をまとめるに当って、文献を提供して下さい各氏に感謝します。

参考文献

その1

- 1) Adams, S., B.R. Strain, and M.S. Adams. Water-repellent soils and annual plant cover in a desert scrub community of southeastern California. p.289-295. In Water-Repellent Soils. DeBano and Letey (Eds). University of Calif. Riverside. (1969)
- 2) Adamson, A.W. An adsorption model for contact angle and spreading. J. Colloid Interface Sci. 27 : 180-187. (1968)
- 3) Bond, R.D. The influence of the microflora on the physical properties of soil. II Field studies on Water repellent sands. Aust. J. Soil Res. 2 : 123-131, (1964)
- 4) Bond, R.D. The occurrence of water repellent soils in Australia. p.1-3 In Water-Repellent soils. DeBano and Letey (Eds). University of Calif. Riverside. (1969)
- 5) Bozer, K. B., G.H. Brandt, and J.B. Hamwall. Chemistry of materials that make soil hydrophobic. p.189-204 In Water-Repellent soils. DeBano and Letey (Eds). University of Calif. Riverside. (1969)
- 6) DeBano, L.F. Formation of non-wettable soils involves heat transfer mechanism. U.S. Forest. Serv. Res. Pacific S.W. Forest and Range Exp. Sta., Berkeley, Calif. PSW-132, (1966)
- 7) DeBano, L.F. and J.S. Krammers. Water-Repellent soils and their relation to wildfire temperatures. Bull Int. Assoc. Soil Hydrol. 11 : 14-19, (1966)
- 8) DeBano, L.F., J.F. Osborn, J.S. Krammers and J. Letey. Soil wettability and wetting agents our current knowledge of the problem. U.S. Forest Serv Res. Pacific S.W. Forest and Range Exp. Sta., Berkeley, Calif. PSW-43. (1967)
- 9) DeBano, L.F. Observations on water-repellent soils in Western United States. p. 17-30 In Water-repellent Soils. DeBano and Letey (Eds). University of Calif. Riverside. 1969.
- 10) Emerson, W.W. and R.D. Bond. The rate of water entry into dry sand and calculation of the advancing contact angle. Aust. J. Soil Res. 1 : 9-16. (1963)
- 11) Fink, D.H. and L.E. Myers. Synthetic hydrophobic soils for harvesting precipitation. p.221-240 In Water-Repellent Soils. DeBano and Letey (Eds). University of Calif. Riverside. (1969)
- 12) Hammond, L.C. and T.L. Yuan. Methods of measuring water repellency of soils. p.49-60 In Water-Repellent Soils. DeBano and Letey (Eds). University of Calif. Riverside. (1969)
- 13) Holzhey, C.S. Water-repellent soils in Southern California. p.31-41 In Water-Repellent Soils. DeBano and Letey (Eds). University of Calif. Riverside 1969.
- 14) Jamison, V.C. The penetration of irrigation and rain water into sandy soils of central Florida. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 10 : 25-29. (1946)
- 15) Jamison, V.C. Wetting resistance under citrus tree in Florida. p.9-16 In Water-Repellent Soils. DeBano and Letey (Eds). University of Calif. Riverside (1969)
- 16) Kolyasev, F.E. and A.G. Holodov. Hydrophobic earth as a mean of moisture-thermal-and electric insulation. p.298-307. In Water and its Conduction in soils. Special report 40. Highway Res. Bod. Pub. 629. National Acad. of Sci. National Res. Council (1958)
- 17) Letey, J., J.F. Osborn and R.E. Pelishek. Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand. Soil Sci. 93 : 149-153. (1962)
- 18) Michaels A. S. The waterproofing of soil and bulding materials. p.329-383. In Waterproofing and Water Repellency. Elsevier Pub. Com. N.Y. 1963.
- 19) Miyamoto, S. and J. Letey. Determination of solid-air surface tension of porous media. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35 : 856-859. (1971)
- 20) Miyamoto, S., J. Letey, and J.F. Osborn. Water vapor adsorption by water repellent soils at equilibrium. Soil Sci. In print (1971)
- 21) Mustafa, M.A., J. Letey, and C.L. Watson. Evaluation of the intrinsic permeability and diffusivity concepts to predict horizontal infiltration in porous media. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34 : 369-372 (1970)
- 22) Myers, L.E. Waterproofing soil to collect precipitation. J. of Soil and Water Conserv. 16 : 281-282. (1961)
- 23) Myers, L.E. and G.W. Frasier. Creating hydrophobic soil for water harvesting. Irrig. and Drain. Div. ASCE 95 : 43-54. (1969)

- 24) Nielsen, D.R., J.W. Biggar and J.M. Davidson. Experimental consideration of diffusion analysis in unsaturated flow problems. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 26 : 107-111. (1962)
- 25) Philip, J.R. The theory of infiltration. IV Sorptivity and algebraic infiltration. equations. *Soil Sci.* 84 : 257-264. (1957)
- 26) Savage, S.M., J.P. Martin and J. Letey. Contribution of some soil fungi to natural and heat-induced water repellency of sand. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33 : 405-409. (1969)
- 27) Wander, I.W. An interpretation of the cause of resistance to wetting in Florida soils. *Proc. Florida Hort. Soc.* 92. (1949)
- 28) Watson, C.L. and J. Letey. Indices for characterizing soil water repellency based upon contact angle surface tension relationships. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34 : 841-844. (1970)
- 29) Woudt, B.D.V. Resistance to wetting under tropical and subtropical conditions. p.7. In *Water-Repellent Soils*. DeBano and Letey (Eds). University of Calif. Riverside. (1969)

そのII

- 1) Adamson, A.W. An adsorption model for contact angle and spreading. *J. Colloid Interface Sci.* 27 : 180-187. (1968)
- 2) Black, W. Basic chemistry of surface-active agents P. 133-142 In *Water-Repellent Soils*. DeBano and Letey (Eds). University of California, Riverside. 1969.
- 3) Bozer, K.B., G.H. Brandt, and J.B. Hemwall. p. 189-204. In *Water-Repellent Soils*. DeBano and Letey (Eds). University of California, Riverside. (1969)
- 4) Brandt, G.H. Soil physical properties altered by adsorbed hydrophobic materials. p.205-220. In *Water-Repellent Soils*. DeBano and Letey (Eds). University of California, Riverside. (1969)
- 5) Fink, D.H. and L.E. Myers. Synthetic hydrophobic soils for harvesting precipitation. p.221-240. In *Water-Repellent Soils*. DeBano and Letey (Eds). University of California, Riverside. (1969)
- 6) Fountaine, E.R. Investigations into the mechanism of soil adhesion. *J. of Soil Sci.* : 251-263. (1954)
- 7) Harris, R.F., G. Chesters. and O.N. Allen. Dynamics of soil aggregate. *Adv. in Agronomy.* 18 : 107-169. (1966)
- 8) Hemwall, J.B., D.T. Davidson, and H.H. Scott. Stabilization of soils with 4-tert-butylpyrocatechol. *Highway Res. Bd. Bull.* 357 : 1-11. (1962)
- 9) Hemwall, J.B. and K.B. Bozer. Moisture and strength relationships of soils as affected by 4-tert-

butylpyrocatechol. *Soil Sci.* 98 : 235-243. (1964)

- 10) Miyamoto, S. and J. Letey. Determination of solid-air surface tension of porous media. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35 : 856-859. (1971)
- 11) Miyamoto, S., J. Letey, and J. Osborn. Water vapor adsorption by Water repellent soils at equilibrium. *Soil Sci.* In press. (1971)
- 12) Mustafa, M.A. and J. Letey. The effect of two nonionic surfactants on aggregate stability of Soils *Soil Sci.* 107 : 343-347. (1969)
- 13) Myers, L.E. and G.W. Frasier. Creating hydrophobic soil for water harvesting. *Irrig. and Drain. Div. of ASCE* 95 : 43-54. (1969)
- 14) Philip, J.R. Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous media. *J. Geo. Phys. Res.* 69 : 1553-1562. (1962)
- 15) Pouloussilis, A and E.C. Childs The hysteresis of pore water : The non-independence of domains. *Soil Sci.* 112 : 301-312. (1971)
- 16) Topp, G.C. Soil Water hysteresis : The domain theory excluded to pore interaction. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35 : 219-225. (1971)
- 17) Watson, C.L. Hydraulic conductivity of soil as influenced by surfactants. p.163-169. In *Water-Repellent Soils*. DeBano and Letey (Eds). University of California, Riverside. (1969)
- 18) 秋山豊 : 土壌の付着性について, 土壌の物理性 24 : 21-26. (1971)

そのIII, IV

- 1) Black, W. Basic chemistry of surface-active agents p.133-142. In *Water-Repellent Soils*. DeBano and Letey (Eds). University of California, Riverside. (1969)
- 2) Bozer, K.B., G.H. Brandt, and J.B. Hemwall. Chemistry of materials that make soil hydrophobic. p.189-204. In *Water-Repellent Soils*. DeBano and Letey (Eds). University of California Riverside. (1969)
- 3) Brandt, C.H. Soil Physical properties altered by adsorbed hydrophobic material. p.205-220. In *Water-Repellent Soils*. DeBano and Letey (Eds). University of California, Riverside. (1969)
- 4) Emerson, W.W. and R.D. Bond. The rate of water entry into dry sand and calculation of the advancing contact angle. *Aust. J. Soil Sci.* 1 : 9-16. (1963)
- 5) Endo, R.M. The deleterious effects of two non-ionic surfactants on the germination and growth of various grasses. p.327-334 In *Water-Repellent Soils*. DeBano and Letey (Eds). University of California,

- Riverside. (1969)
- 6) Hammond, C.L. Capillary adsorption of alcohol, as an index of soil structure. *Soil Crop Sci. Soc. Florida* 24 : 125-130. (1964)
 - 7) Hemwall, J.B., D.T. Davidson, and H.H. Scott. Stabilization of soils with 4-tert-butylpyrocatechol. *Highway Res. Bd. Bull.* 357 : 1-11. 1962.
 - 8) Hemwall, J.B. and K.B. Bozer. Moisture and strength relationships of soils as affected by 4-tert-butylpyrocatechol. *Soil Sci.* 98 : 235-243. 1964.
 - 9) Jackson, R.D. Porosity and soil-water diffusivity relations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27 : 123-126. (1963)
 - 10) Klute, A.A. A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials. *Soil Sci.* 73 : 105-116. (1952)
 - 11) Kolyasev, F.E. and A.G. Holodov. Hydrophobic earth as a means of moisture-, thermal-, and electric-insulation. p.298-307. In *Water and its Conductance in Soils. Special Report. 40 Highway Res. Bd. Pub. 629. National Academy of Science. NRC.* (1958)
 - 12) Letey, J., J. Osborn, and R.E. Pelishek. Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand. *Soil Sci.* 93 : 149-153. (1962)
 - 13) Miyamoto, S. and J. Letey. Determination of air-solid surface tension of porous media. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35 : 856-859. (1971)
 - 14) Miyamoto, S., J. Letey, and L.V. Weeks. Evaluation of the similarity hypothesis to predict capillary hysteresis in porous media. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* In press. (1971)
 - 15) Mustafa, M.A., J. Letey, and C.L. Watson. Evaluation of the Intrinsic-permeability and -diffusivity concepts to predict horizontal infiltration in porous media. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34 : 369-372. (1970)
 - 16) Myers, L.E. Waterproofing soil to collect precipitation. *J. Soil & Water Conserv.* 16 : 281-282. 1961.
 - 17) Myers, L.E. and G.W. Frasier. Creating hydrophobic soil for water harvesting. *J. Irrig. & Drainage. Div. ASCE.* 95 : 43-54. (1969)
 - 18) Nielsen, D.R., J.W. Bigger, and J.M. Davidson. Experimental consideration of diffusion analysis in unsaturated flow problems. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 26 : 107-111. (1962)
 - 19) Osborn, J., R.E. Pelishek, J.S. Krammers, and J. Letey. Soil wettability as factor in errodability. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28 : 294-295. (1962)
 - 20) Osborn, J., J. Letey, L.F. DeBano, and E. Terry. Seed germination and establishment as affected by non wettable soils and wetting agents. *Ecology* 48 : 494-497. (1967)
 - 21) Parr, J.F. and A.C. Norman. Effects of nonionic surfactants on root growth and cation uptake. *Plant Physiol.* 39 : 502-507. (1964)
 - 22) Parr, J.F. and A.G. Norman. Considerations in the use of surfactants in plant systems : a review. *Bot. Gaz.* 126 : 86-96. (1965)
 - 23) Pelishek, R.E., J. Osborn, and J. Letey. The effect of wetting agents on infiltration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 26 : 595-598. (1962)
 - 24) Philip, J.R. Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous media. *J. Geo. Phys. Res.* 69 : 1553-1562. (1962)
 - 25) Philip, J.R. The theory of infiltration. IV Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.* 84 : 257-264. (1957)
 - 26) Philip, J.R. Limitations on scaling by contact angle. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35 : 507-508. 1971.
 - 27) Rubin, J. Numerical method for analyzing hysteresis-affected post-infiltration of soil moisture. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31 : 13-20. (1967)
 - 28) Staple, W.J. Moisture tension, diffusivity and conductivity of a loam soil during wetting and drying. *Can. J. Soil Sci.* 45 : 78-86. (1965)
 - 29) Staple, W.J. Comparison of computed and measured redistribution following infiltration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33 : 840-847. (1969)
 - 30) Watson, C.L. Hydraulic conductivity of soil as influenced by surfactants. p.163-175. In *Water-Repellent Soils. DeBano and Letey (Eds). University of California, Riverside.* (1969)
 - 31) Watson, C.L. The influence of liquid surface tension and liquid-solid contact angle on liquid entry into porous media. *Soil Sci.* (In press). (1971)

砂漠の国クウェートの緑化研究に従事して

寺 沢 四 郎*

昨年5月21日、KLM 航空で熱砂の国クウェートに向い、一年余にわたる緑化研究に従事して、本年8月5日に無事帰国して参りました。砂漠の緑化研究は、クウェート科学研究所 (Kuwait Institute for Scientific Research) が3カ年の計画で実施するもので、クウェートの財政石油省の招請により日本政府の派遣職員として出張を命ぜられました。従来の東南アジア方面の技術援助と異なり、クウェートの科学振興費によるプロジェクト研究のため、本誌に研究成果の詳細な発表はしかねますので、クウェートの現状を紹介することになってしまいましたことを御理解願いたいと思います。

(1) 熱砂の国クウェート

緑したる5月晴れの日本を飛び立ち、フィリピン、タイ、インド、パキスタンを経由して目指すクウェート上空にさしかかった時は、もう日もとっぷりと暮れ、ペルシャ湾上を往きかう石油タンカーと、海上油田のヤグラを照らすサーチライトが手にとるように見える。視線をあげると、あたかもかがり火のごとく、点々と油田の真赤な炎が夜空をこがしていた。飛行機は、どんどん高度を下げ、油炎に映える黒々とした砂漠が波のように続いているのを見たとき、はたといいい知れぬ感慨がこみあげてくるのに気がついた。クウェート空港でタラップを下りると、異常な暑さが全身をふきぬけ、ある種の目まいに襲われてしまった。アラビアの熱砂の渦のかなたから運ばれた異様な熱気が旅人の心身を刺激せずにはおかない。クウェートは、不名誉な世界一の暑さをほこっており、8月の日かげの平均気温は45℃、これが直射日光を受けると75℃にもものぼり、日なたはちようど大火事の現場にとび込んだようだ。しかし、湿度は10%にも乾いているので、汗はかかないし思ったほど暑く感じない。

初めて、クウェートの地をふんだ空港は、市の中心から北東30kmほどの砂漠のどまん中にある。深夜の空港では研究所長をはじめ研究所の日本人やアラブ人に迎えられ、光々と照らされたアスファルトの直線道路を時速120kmで一路サハラホテルに案内され異国の一夜を過ごした。車内や家の中は完全な冷房がきいているので、外

の暑さとはうって変った別世界で快適である。

着任後まもなく、研究所長の案内で政府関係者に挨拶にまわりながら、クウェート市内をむさぼるように車窓を眺めた。市内は何を見ても珍しかった。6月ともなれば、頭の上では強い太陽の光がギラギラと輝き、帽子とサングラスをかけないと目まいを起しそうである。クウェート人(クウェーティー)はゴトラという白布を帽子代りにし、ガウンのような白装束をまとい、ラクダの皮で作ったサンダルを履いて、いかにも涼しそうである。私はこのゴトラを通して砂漠に住むアラビア人の長い生活の知恵が秘められているのを知った。ゴトラをかぶると前頭部はヒサシがほんのわずか出ているだけで、白い布が肩一面を覆って後に垂れ下がっている。しかしこの後頭部の保護こそ日射病にかからぬ唯一の重要なポイントなのである。これはまた、度々、襲来する砂嵐の防砂塵の役目をし、冬は防寒にもなる。

クウェート市から約40kmはなれた砂漠の試験圃場に出かけるときは、必らずアラブ人から贈られたゴドラを覆って出かけた。ゴドラをかぶった日本人は一見アラブ人に見えるが、なんとなく借り物をつけた感じである。アラブ人は、ハイティーンから口ヒゲをはやし、一様にアゴヒゲをつけているので、ゴドラと良くマッチしている。そのヒゲも濃く長いものほど立派なものときれ、いかにも砂漠の男性的な象徴のようにみえるのである。

果てしなく広がる砂漠に立って、灼熱の太陽を受けた時は、おそらく何人も太陽を悪魔のように思うに違いない。おそらく日本人にとって、太陽は、慈母のように優しい女性そのものにうけとめられている。私は、幼い頃からこのかた、朝日を拝み、夕日に別れを告げるほど太陽像を恋い慕い、あがめて来た。しかし、一たん砂漠のきびしい自然に立ち向うとき、太陽の価値感に余りにも大きな相違を感じ、この価値感の相違こそしっかりと認識することが、アラブを理解する出発点となるのである。

(2) クウェートの由来

クウェート (Kuwait) とはクート (Kut, 城) のアラビア語化した縮小詞で「小さな城」という意味で、このクートとはペルシャ語から出たメソポタミア南部地方の

* 農業技術研究所 (1972.9.30, 受理)

俗語であるという。

クウェートは君主国であり、サバーハ家の家長サバーハを首長（アミール）に選んだのは1756年のことである。首長の地位はその後同家によって世襲され、現在11代目のアブドゥラーが首長である。1962年11月に憲法が公布され、民主主義の道を歩んでいる。次期首長となる皇太子はサバーハ家の一族から適任者が選ばれ、国会の承認を必要とされており、世界の君主国の中でも最も民主主義的なルールをふんでいると自慢している。元首は国王ではなく首長であり王国とうたっていない。このような低姿勢ぶりは、クウェートをとりまく、共和国を刺激しないよう細かな気の配りようである。

クウェートは文字通り砂漠の国である。ペルシャ湾のエメラルド色の海とはきわだった対照をなして、一本の木さえ生えぬ赤紫色の砂漠が熱気のもやのかなたに広がっている。

国の広さは、15,000km²（岩手県なみ）で人口は約75万人と推定される。その人口の約半分は原住民のクウェーティで占められ、残りはクウェート以外の外人である。この人口のアンバランスは「軒を貸して母屋をとられる」ような事態を防ぐため、政府は独立前から特令を設けてクウェーティの保護にのり出している。例えば、どんな会社でも一人のクウェーティを協力者としなければ会社の設立ができない。こうしてクウェーティの間には名義を貸すだけで、黙って金がころがりこむしくみになっている。また重要な政府公共事業関係者はすべてクウェーティであり、警察官とハイヤーの運転手はクウェーティでなければならない。

かつてのクウェートは、天然の良港に恵まれ、貿易港として、また漁港として栄えたといわれる。今、この港は世界の大型タンカーが昼夜をわかつたず往来しており昔のおもかげはない。いまやクウェートはまさに“石油に浮かぶ国”であり、世界の石油資本がひしめき合って石油を採掘している。クウェートの地下に眠る“黒い黄金”の埋蔵量は実のところ正確にわかっていない。1964年の確認埋蔵量は87億tといわれ世界の石油の約2割を占めるといわれる。外国の石油会社とクウェート政府間では、利潤折半方式がとられ、毎年、莫大な石油収入が雪だるまのようころがりこんでいる。クウェーティ1人当りの国民所得（\$4,000）はアメリカを追い越し世界第一である。砂漠の遊牧生活から近代的生活に移る10数年の間に金の使いみちに困るほど、石油利権の金が流れこみ、そのあまりの富裕ぶりがアラブ諸国をねたませる結果となる。こうした背景もあってクウェートは「アラブ経済開発のクウェート基金」を設立し、アラブ兄弟国の国づくりのために資金を提供している。

一方、クウェートは面目を一新し、建物、道路の建設に異常なエネルギーを注ぎこんでいる。今、クウェートは、地図も書けないほどのスピードで都市造りが進められ、町はアラビアンナイトを思わせるモダンな建築と、緑したたる街路樹が植えられ、キャデラックが猛スピードで走っている。クウェート人は富を示すのに「車の数と植木の数」といわれるほど、庭木には莫大な金をかけている。一本の植木を維持するのに年に10～25万円かかるといわれる。砂漠では水は最も貴重なものであるが、クウェートは1953年に世界最大の海水蒸溜工場を建設した。現在の製水能力は日産1,000万英ガロンといわれ、人口増加と生活水準の向上で水の需要は増すばかりである。この蒸溜水に稀薄塩水をまぜて味をつけ、市民に供給される。この国では、持ちまえたの石油を使って電気と水をふんだんに生産し、街路樹にはタンクローリーで運ばれた水がかんがいされている。彼らにとっては、風にそよぐ緑の樹木は、宝石以上に生活の豊かさを物語る象徴なのである。目下クウェート政府は、都市だけでなく、国土全体を緑化しようとしている。この雄大な計画は単に緑化を目指しているのではなく、かつてクウェートに存在しなかった農業をおこし、自給自足の夢を抱いているのである。目下、石油以外の物資は輸入にあおぐ世界一の輸入消費国であり、「石油以後」の福祉国家から一転、過疎国家への危機を乗り越えるために、自然改造がもくろまれている。かつての文盲をなくすために、教育に異常な熱意がみられ、教育費はタダである。また、外国の優秀な頭脳を輸入して科学技術教育の向上を計り、また医療費も一切国家負担としている。さらに税金はピター一文もとられないから、まさに超福祉国家といっても過言ではない。これが石油に浮かぶ国の姿である。

(3) クウェート科学研究所

目下、クウェートは石油以外はすべて外国物資に依存している。したがって、石油なきあとの自立生産の道を模索し、国土開発のための科学技術の振興に力を入れている。クウェート科学研究所は、1967年にアラビア石油（石油利権会社）とクウェート政府との協定で国民福祉寄与のために設立されたものである。発足当初は、半官半民の研究所であったが、現在は完全にクウェート政府の附属機関となり、世界の研究者、技術者を集めて積極的な研究活動を展開している。

研究活動分野は、現在、①石油部門：石油の現地における効果的利用、②水産部門：アラビア湾の海洋水産開発を指向し、現在エビの養殖技術を開発中、③農業部門：砂漠農業開発を目標に、現在緑化技術の開発が進められている。研究活動は広くクウェート国の国民福祉を最

高の目標にしているが、合せて、科学研究の各分野におけるアラブ人研究者、技術者の養成を目的としている。

農業部門のプロジェクト研究は、砂漠の緑化に関する研究であり、クウェート政府公共事業省農業部農事試験場と分野を分けて提携して進められている。このレギュラーメンバーは日本人4人、アラブ人2人であり必要に応じて労務者が加勢される。

農業と水産部門には日本の大学及び政府諸機関から研究者及び技術者が招へいされている。石油部門は、フランスのメンバーが基礎的研究を担当している。

クウェート研究所長は、A. M. Al-Ahamali 博士であり、彼はクウェート三羽鳥の一人といわれる切れ者で、クウェートの科学研究のリーダーシップをとっている。研究所の事務局員は約20人のアラブ人が携わって、研究活動を全面的にサポートしている。

(4) 砂漠の緑化で自然改造をもくろむ¹⁾

クウェート市内は、人間の急増と、自動車の氾濫により、自然のバランスが急速に乱されてきている。現在、人口は75万人、自動車の数は15万台といわれる。自動車1台のガソリン消費が1.5 l/dayとすれば、1日23万 l のガソリン消費量となる。このガソリンの燃焼により、消費される酸素の量は、5,000ha の森林から生産される酸素量に匹敵するといわれる。

現在、空気中の酸素は、アラビアンガルフのプランクトンによって生産されるといわれる。それでも、なお不足の酸素は、2,500ha の森林から生産しなければならなくなる。

クウェート市とその郊外における地下水レベルは、約6mといわれる。浅いところは、1.5m、平均2.7mである。その Salt concentration はかなりたかい。E. C. で20mmho/cm, Kuwait Government, Research Station の分析によれば、Total dissolved solids は、15,000 P. P. M. である。しかし、Salt-tolerant plant を用いれば、森林の造成は困難ではない。たとえば、プロソピース、タマリスク、ユーカリなどは、この種の耐塩性植物となる。

クウェートの砂漠では、次の5つの植生帯がみられる。

- 1) *Salsola* community zone (ヒユの属)
- 2) *Zygophyllum* // // (?)
- 3) *Cyperus* // // (イの属)
- 4) *Rhanterium* // // (キクの属)
- 5) *Haloxylon* // // (ヒユの属)

上記の各植生帯は、海岸から遠ざかるにつれて、明瞭に観察することができる。

クウェートの雨量は、年間平均100mm だけであり、自然植生は、草木とかん木からなりたっている。森林はみることができない。そこで、約10年前から、クウェート政府は、公園林や街路樹の造成をかんがいしながら行なってきた。目下、各植生帯の植生調査が続行されている。

砂漠の緑化研究計画では、まず、砂漠の立地条件と植物生態系の調査が中心に進められ、一方、緑化技術開発のために水の有効利用に関する研究と緑化に適性な植物の選定などの試験研究が平行的に行なわれている。筆者の分担した研究課題は、①土壌の物理性に関する研究、②水の有効利用に関する研究、③自然砂漠における水収支に関する研究などである。これらの研究は、乾地農業の開発には不可欠な重要課題で、目下これらの成果をもとに、さらに緑化工法の研究が押し進められている。

現在、クウェートにおける緑化技術で必要なことは、次の点があげられる。まず、有機無機質資材の施用による砂漠土壌の理化学性の改良、乾期(6月~10月)における適正かんがい、蒸発と風蝕防止のためのマルチングの利用、緑化のための適性植物の選定、牧畜による植物群落の破壊防止及び防風林の造成などである。このような緑化技術は、さしあたりクウェート市内とその郊外の緑化計画に具体的に導入されることになる。

いま、クウェートは財力にものをいわせて、ビルや道路などが盛んに作られている。しかし人間と植物の生物環境の改善は、厳しい気候と立地条件にはばまれて思うように進んでいない。いうまでもなく、この種の自然改造は、その国の気候風土に育った自然科学の振興なしには、長期的な発展は望めない。

砂漠を緑の“じゅうたん”に、これがクウェート人の切実なあこがれである。

引 用 文 献

- 1) Shimizu. M. Terasawa. S. and Suzuki. T. : Vegetation in Kuwait and its Suburbs and how to Revegetate it, Report of Kuwait Institute for Scientific Research, (1972).

土 粒 子

環境の構造と植物の生活

植物栄養の分野で働らく者の一人として反省している点を若干述べさせて頂き、物理学者のご援助を期待したい。

植物の生活空間は一般に不均一であり、したがって構造をもっているはずである。それは植物に作用すると同時に、植物の活動による反作用をうけて刻々と変化する。われわれが植物のよき理解者となるためには、このような環境の構造の動態を適確にとらえ表現する手法を開発することが要求される。

門司・佐伯(1953)は、植物群落の光合成を支配するおもな内的因子が個々の葉の光合成能力と葉量だけではなく、群落構造(葉の空間配置と角度分布)にあることを数学的モデルとして明示した。群落の構造は群落内における光の時空的分布やガス拡散係数などと密接に関係していることが明かにされつつある。

ところで筆者のように物理学的手法に弱者や植物の側にたって考えることの少い『化学分析学派』の多くは、環境の動的な構造に目をつぶり、それが均一で静的なものであるという安易な仮定の中に逃避しながら仕事を進めてきた感がある。われわれは平均的な強度因子と容量因子をたよりに、時には強度因子だけで勝負しようとする習性をもっている。亜硫酸ガスによる可視障害は気中濃度〇〇 ppb で発生し、養分欠乏のおこる限界培地濃度は〇〇モルであるといった記述が多い。しかし現実はこのような考え方で処理できるほど単純ではない。風速が大きいほど群落のガス吸収は増大し、培養液が流動している場合には根にたいする養分の親和性(見かけ上の)が強まるのである。

よく繁った栄養生長期の水稻群落は天気の良い日には1日1m²あたり約800mgのN、60mgのP、1,000mgのKなど大量の養分を吸収するだろう。このとき根の近傍の養分はたちまち消耗され、養分吸収は、土壤溶液中の平均濃度がかなり高くても、根圏土壤からの養分の

離脱や溶液の遠隔移動の速度などによって制限されるといいう可能性がでてくる。

同化箱を用いた光合成測定のみには、箱内の気流の状態が戸外のそれとかけはなれたものであるため、測定結果の取扱いについて非常な慎重さが要求される。また気流の構造を十分考慮したガス採取法が不可欠である。

たとえば細長い同化箱の下端から一枚のイネの葉を挿入し、上端から1.1 l・min⁻¹の空気を送りこみながら出口(下端)の空気の一部、0.5 l・min⁻¹を分析計に導く。このとき出口の中心部からサンプリングするか、常法にしたがって周辺部から採取するかによって分析値がいちじるしく異なることを筆者は経験した。前者の場合には蒸散と同化の値が過大となり、後者では過小となる。

土壌の配置パターンも植物の生活にとって決定的な影響をもつことがある。土壌肥料学会関東支部会のエクスカッションで盆栽村を見学したさい、植物の背の低さと土層の薄さが強く印象にのこった。両者の関連を確めるため、500mlの砂に適量の肥料をまぜ、それをシリンダーにつめた区と大きなシャーレに広げた区をもうけ、水稻を湛水栽培した。容器は地下部を遮光し、水槽に浸して地温をほぼ等しくした。シリンダー区はごく正常な生育を示したが、シャーレ区は顕著に矮生化し、全ての生育指標が劣悪であった。このように養分濃度、土壌容量、三相構造などが同一であったとしても、植物根の生活空間の全体的な構造がことなれば、地上部を含めた全生育に大きな差違が生ずるのである。ついでながら、盆栽の植物栄養学と土壌学は日本人の手で体系づけたものの一つである。

われわれは環境の構造をないがしろにしてきた報いとして、多くの実験の再検討をせまられている。土壌物理学からの積極的な助言が望まれる。

(農技研・作物栄養科・水落勤美)

新刊の紹介

農地工学 (上・下)

山崎 不二夫 著

上下635頁, 各1,800円, 東京大学出版会(1971, 72)

本書は農地の造成・整備・保全に関する研究の現在の到達点を農地工学という名のもとに整理したものである。農地について何も知識を持たない者が本書を一読したとしよう。その者はおそらく自分が農地の造成・整備・保全の専門技術者になったかのような感を抱くにちがいない。それほど本書はバランスよく研究成果を整理しているのである。工学なるものが自然とは直接にかかわり少ないものを対象として進もうとしている大勢のなかで、自然そのものである土地との境界が分かち難い農地を対象とする工学が生まれるにあたっての研究成果の整理には一工夫も二工夫も必要としよう。本書では、農地とは土地生産性・労働生産性・保全性の高い土地であると規定して、この三要性を左右する因子を土地・土層に関する因子、気象的因子、空間的配置に関する因子に分けて明らかにし、この三要性を高めるためのこれら三因子を変化させる手段を記して農地工学を誕生させている。これは一つのあり方であろう。上巻第一編で農地工学がいまに生まれえた歴史的必然性ならびに現在でのその必要性が述べられている。続く第二編が水田編であるが、その第四章水田の浸透が土地・土層の因子をかえることで土地生産性を高める観点で述べられ、第五章水田の排水が農業機械を媒介にした労働生産性を、そして第六章水田の耕地組織が総合的に労働生産性を、それぞれ高める観点で述べられている。下巻が第二編で畑地の工学である。その第四章第五章の畑地の保水と畑地の通気が土地・土層の因子を変えることで土地生産性が高まる観点で述べられ、第六章畑地の土壤保全是文字通り保全性を高める観点で述べられている。第七章が畑地の耕地組織でこれは労働生産性を高める観点に立つものである。各編の始めの三つの章は水田、畑地それぞれの三要性を左右する三因子の大きさ、制御性の評価に使われ、大変興味深いところである。上巻水田編には全体に生気がみなぎり内容も豊かで重みがあるのに比して、下巻畑地編では、全体としても粘り濃さが薄く、特に通気・保全・耕地組織の章にくらべて保水の章には重さを感じられないのはなぜだろうか。日本の農地工学の特異性のなせるわざであろうか、軽くすまされているところには本来的

に農地工学としての研究のあがりがいまだ少ないからなのであろうか。本書の著者には“農地造成”なる成書がある。かつてそこに納められていま本書の各論で十分記述の足りた部分を除く農地工学的な内容が水田編、畑地編ともに最後に納められている。以前に比して新しい内容が織り込まれていることはいうまでもない。ここに技術学から工学への研究(者)の自発的指向のふるまいを見る思いがする。

ところで、学生のではないもっと広い内容での教育についてよく言われることに、工学の教育は大変に難しいということがある。工学の進展があまり連続的ではないためのようだからである。仮に連続的な思考の論理によって工学を構成するに難いとしても、社会の技術的要請や近接諸科学技術の進歩あるいは基礎科学の進歩の種々相との構造的なつながりを明らかにすることはある程度可能であろう。本書でも、土地への人の働きかけの風土、歴史を所々に適切にはさむことでこのことを試みているように思える。しかしながら、それほどどちらかといえば農政の変転による農地の工学の要請の変転を列記し風土の違いを列記したに止められたきらいがある。基礎科学ならびに近接諸科学技術の進歩と農地の工学とのかかわりについても同次元の扱いに止められたきらいがある。この意味で、各論で展開される個別技術を題材にして読者が工学教育を享受することは、すべてにそうであるとはいわないが、本書においてもいささか至難の業といわざるをえない。本書は、それほどそつなく美しく農地工学における技術とそれにかかわりの深い近接諸科学技術および基礎科学が水平的にまともよく並べられたものなのである。農地工学における技術を貫ぬく縦の線、農地工学における技術の進展の不連続性をつなげるフィロソフィの獲得は、生まれたばかりの農地工学の初の成書に求めるのはおそらく間違いなのであろう。今後の研究に求めなければならないものであるようだ。今後の農地工学者には今まで以上に高いポテンシャルの山を越えることがいま要求されているようである。

(中野政詩・東大農)

会 務 報 告

(昭和47年5月2日～47年10月31日)

第9回事務局会議

47.6.1 農技研

〔出席〕 国分・田淵・増島・久保田・仲谷・長野間・根本

1 庶務・会計・編集関係経過報告

編集関係は会誌26号は印刷中、27号は6月上旬各分野2～3人づつ推せんし、8月中旬頃までに原稿をあつめる。

2 秋のシンポジウムについて

秋のシンポジウムを含め11月中旬までの活動予定をたてる。シンポジウム課題、講演候補者への交渉をはじめめる。

3 その他

15周年記念事業のため、検討準備委員会(土肥・土木・機械などの分野10名位)を足踏させたい。

第10回事務局会議

47.6.22 農技研

〔出席〕 国分・横井・田淵・増島・久保田・仲谷・長野間・根本

1 評議員会提出議題の検討

- 庶務・会計・編集関係経過報告
- 秋のシンポジウムについて
- 次期評議員選挙にともなう選挙管理委員会について
- 15周年記念事業について

第2回評議員会(46年度)

47.6.22 農技研 新館会議室

〔出席〕 国分・田淵・横井・長堀・木下・湯村・岩田各評議員・増島・久保田・仲谷・長野間・根本各幹事

議題1 庶務・会計・編集関係経過報告(46.11.19～47.6.22)を承認された

2 第14回シンポジウム課題を承認。期日は11月16日(木)、場所は農技研講堂に決まる。

3 次期評議員選挙に伴う選挙管理委員会・委員長 草野秀(農事試) 委員に増島博・仲谷紀男・長野間宏・根本清一に決まる。開票立会人については、時期になってから2名依頼する。

4 15周年記念事業の具体的な推進方法については後日在京評議員会を開いて検討することになった。

第1回選挙管理委員会

47.7.13 農事試

〔出席〕 草野・増島・仲谷・根本・長野間

評議員選挙のすすめ方は次の予定で行なう。

- 名簿は会誌26号に刷込む
- 7月15日投票用紙印刷
- 8月15日投票用紙発送
- 9月15日投票メチ
- 9月下旬開票

在京評議員会

47.9.8 農技研

〔出席〕 山崎・八幡・山沢・横井・寺沢各評議員、事務局 国分・田淵・増島

6月22日の評議員会の意向に基づき、15周年記念事業の内容と推進方法について検討した結果、土壌物理用語の解説とデータブックを併せて作製することになった。なお、10名内外の記念出版編集委員会を構成して、国分・寺沢両評議員が正副委員長となって事業を推進することになった。

第11回事務局会議

47.9.11 農技研

〔出席〕 国分・横井・田淵・増島・仲谷・長野間・根本

1 庶務・会計経過報告

2 第14回シンポジウムについて

前日、当日の幹事の配置を決める。当日の時間は前回同様9:30開会、17:00閉会とする。

3 その他、9・8在京評議員会の報告が会長からされた。

第2回選挙管理委員会

47.9.25 農技研 中会議室

〔出席〕 草野・仲谷・長野間・根本各委員 粕淵・白井(喬)立会人

評議員選挙開票結果

総投票者数 131名

総投票数 640票

当選 木下 彰 (北海道地域)
 徳永光一 (東北 //)
 横井 肇 (関東 //)
 湯村義男 (中部 //)
 富士岡義一 (近畿 //)
 美園 繁 (中四国 //)
 鬼鞍 豊 (九州 //)
 岩田進午
 国分欣一
 寺沢四郎

竹中 肇
田淵敏雄
佐久間敏雄
八幡敏雄
中村忠春

以上 15名

評議員選挙開票の結果、新評議員は上記の通り相違ありません

昭和47年 9月25日

選挙管理委員長 草野 秀

選挙立会人 粕淵 辰昭

// 白井 喬二

第12回事務局会議

47.10.30 農技研

〔出席〕国分・横井・田淵・増島・久保田・仲谷・長野間・根本

1 庶務・会計・編集関係経過報告

会誌27号は印刷中で11月末発送予定

2 評議員選挙結果報告

3 第14回シンポジウムについて

4 15周年記念出版について

第14回研究討論会

主題：土壌構造をめぐる諸問題

日時：昭和47年11月16日（木）9：30～17：00

場所：農業技術研究所 講堂

講演

北九州の赤色土の土壌微細形態の特徴

有村玄洋（九州農試）

土壌構造と微生物の生育

松口竜彦（農技研）

土壌の保水の構造について

中野政詩（東大農）

土中水と土の物理的・力学的性質

桑原 徹（名城大）

土の力学的挙動と構造

須藤清次（茨城大農）

総合討論

総 会

（新入会員）

岩田久夫 愛知農総試 480—11 愛知郡長久手町岩作

横井義雄 十勝農試 082 河西郡芽室町新生

高橋 強 岡山大農 700—91 岡山市津島

天谷孝夫 岡山大農 700—91 岡山市津島

五十嵐孝典 九州農試畑作 885 都城市横市町6644

塩島光洲 宮城農試 983 仙台市原町小田原榊江27

乃川慶一 宮城県農政部農業普及課 980 仙台市本町3

丁目8番1号

黒沢 諦 宮城農試 983 仙台市原町小田原榊江27

加藤正美 宮城農試 982 仙与市原町小田原榊江27

宮沢 篤 宮城農試 983 仙台市原町小田原榊江27

北沢 昭 宮城農試 983 仙台市原町小田原榊江27

西村樞夫 宮城農試 983 仙台市原町小田原榊江27

鈴木信隆 宮城農試 983 仙台市原町小田原榊江27

横山達平 宮城農試 983 仙台市原町小田原榊江27

中鉢富夫 宮城農試 983 仙台市原町小田原榊江27

減野岩夫 宮城農試 983 仙台市原町小田原榊江27

今野喜一 宮城農試 983 仙台市原町小田原榊江27

岡山清司 富山農試 930—11 富山市布市195

手嶋 渚 明治大農 214 川崎市多摩区生田

（退会者）

船田 周 愛媛大

平沢一雄 東京農大

西村 功 岡山大

堂腰 納 北大農

田村卯八 新潟農試

前田正躬 袖島化学

中出尚夫 栃木県佐野市

袖藤洋爾 山陽パルプ

京都大学農学部農作業機械学研究室

清水弘三 静岡県富士市

原 横紀 草地試

小倉祐幸 宇都宮たばこ試

宮崎大学農学部付属図書館

西川省造 鳥根農試

（住所変更者）

村田恒治 旧 甲府市丸の内

新 山梨県北巨摩郡双葉町大壘100～45

川原田元 旧 帯広市西4条南8丁目

新 北海道開発局開発調査課 札幌市中央区

北3条西4丁目

森健治郎 旧 愛知県岡崎市

新 愛知農総試 愛知郡長久手町岩作

足立嗣雄 旧 東京都北区西ヶ原

新 九州農試環境第2部 福岡県筑後市和泉

有田 裕 旧 東京都北区西ヶ原

新 東北農試企画連絡室 盛岡市厨川赤平

福田幸雄 旧 鹿児島県西之表市

新 出水農業改良普及所 出水市武本10124

横山偉和夫 旧 札幌市北4条西1丁目

新 札幌市雁木町10

黒鳥 忠 旧 東京都目黒区 林試

新 林試関西支場 京都市伏見区桃山町

西村 進 旧 三重大農
 新 栄設計KK 東京都杉並区上荻3-24-13

中田礼嘉 旧 東京都清瀬
 新 相模原市上鶴間1941町田ハイッ B6-101

水越一行 旧 山梨農研
 新 北都留農業改良普及所 山梨県北都留郡
 上野原町上野原4698

桜井俊武 旧 鹿児島市上福元町
 新 農試鹿屋支場内専技室 鹿屋市札市

本田親史 旧 九州農試
 新 農技研 東京都北区西ヶ原

吉良八郎 旧 香川大農
 新 福戸大農 神戸市灘区六甲台町

佐藤晃一 旧 岡山大農
 新 愛媛大農 松山市樽味町118

〔編集後記〕

名簿を刷り込んだ前号を評議員選挙に合わせるべく遅らせて刊行したために、本号も例年より遅れましたが、次号から正常に戻ります。宮本氏の撥水性に関する解説論文は3編に分かれて御投稿頂いたものですが、氏の御諒解を得て、利用し易いように本誌に1回にまとめて掲載しました。

本号は私たち幹事の担当する最後の号です。みな様の御援助でなんとか責任を果たすことができましたこと厚く御礼申し上げます。次号からの編集は北海道地区で担当されます。会員諸兄姉の活発な御投稿により会誌がより充実することを希って筆をおきます。

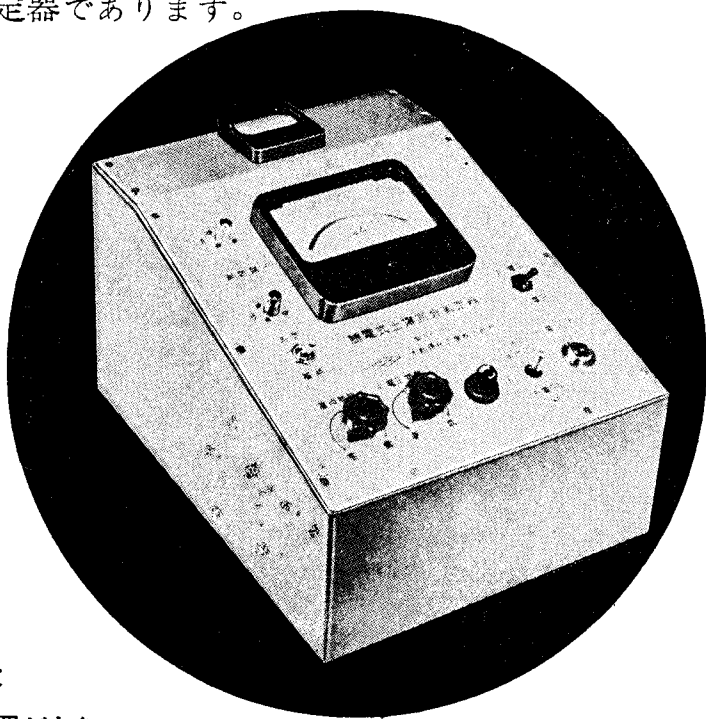
(久保田, 仲谷)

農業技術に革新をもたらす

DIK誘電式土壤水分測定器

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壤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壤水分測定器であります。



特 徴

(1) 測定範囲が大きい

あらゆる土壤に対して、飽和～風乾に至る間の水分変化が的確に測定出来る。

(3) 即応的である

埋没した感体は、直接土壤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。

(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。

(4) 再現性がある

測定に当って、土壤には何の物理化学的変化も与えないで、連続的にくり返し測定ができ、同時にその再現性が充分に保証されている。



大起理化工業株式会社

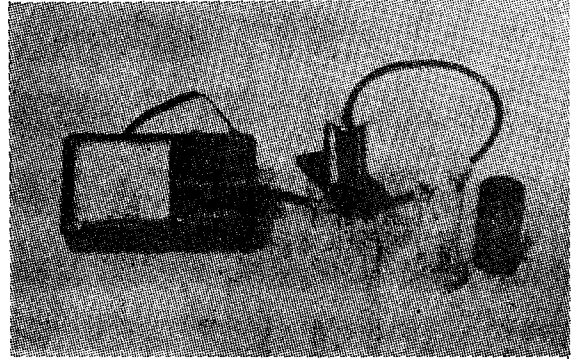
東京都荒川区町屋2丁目16～2
TEL 東京 (802) 2 1 9 1 (代表)

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 ¥25,000

理研科学測定器研究所

東京都足立区伊興町前沼1254

電話 (899) 4874

堆肥不足に

デンボロン®

タバコ・蔬菜の苗床の土作りに
果樹園の土壌を若返らせ、樹勢を恢復させる地力の素

メモ

デ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。

代表製法特許 日本第240330号

(類似品に御注意下さい)

発売元



三菱商事株式会社

本社/東京・丸の内 電(211)0211(代表)

製造元



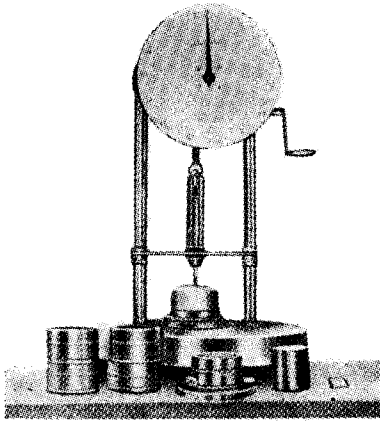
天北化学株式会社

本社/東京・神田 工場/北海道・幌延

電話東京 (252) 4304

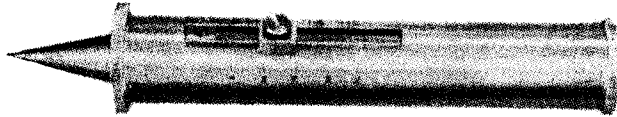
土壤学の権威山中金次郎博士の御指導に依る

各種土質測定器



(山中式土壤粘着力(付着力)測定器)

山中式土壤粘着力(付着力)測定器
山中式加圧透水性測定器 A 型
山中式透水係数測定装置 B 型
油圧式土壤固結力測定器
山中式土壤硬度計 A 型 B 型(平型) C 型(小型)
山中式容積重測定器
山中式現地容積重測定器
山中式最大含水量測定器
山中式ピペット分析装置
山中式凝集力測定器
其他土壤測定に関する諸機械器具設計製造



(山中式土壤硬度計)



製造発売元

株式会社 山村製作所

本社工場 東京都世田谷区奥沢7丁目40番9号(〒158)
電話(03) 701-2334・7535
大井工場 東京都品川区南大井4-3-10(〒140)
電話(03) 761-2032(代表)

15周年記念出版編集委員会よりお願い

このたび本研究会発足15周年を記念して用語集とデータブックを併せて作製することになりました。

つきましては、会員の皆様が下記に関連する手持ちのデータを提供して戴きたく、御協力をお願いいたします。

記

- 1 水分恒数
- 2 力学性
- 3 土壌三相
- 4 特殊土壌の物理性
(火山灰土壌、泥炭土壌、重粘性土壌など)
- 5 その他物理性に関するもの

(連絡先：〒365 埼玉県鴻巣市大字鴻巣1227

農事試験場作業技術部土壌肥料研究室 国分欣一

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、学生会員及び賛助会員、購読会員の4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 | 1,000円 |
| 学生会員 | " | | 600円 |
| 賛助会員 | 1口年額 | | 10,000円 |
| 購読会員 | 会誌年額 | | 1,200円 |

- 第6条 本会に次の役員をおく。任期は2年とし、選出方法は別に定める。
- (1) 会長1名、副会長1名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (2) 評議員
イ 15名 正会員から互選される。
ロ 3名以内 会長が委嘱する。
 - (3) 会計監査 2名
正会員の中から評議員会によって選出される。
 - (4) 幹事 若干名
会長委嘱
- 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 本会に次の委員会をおく。
- (1) 選挙管理委員会
正会員の中から評議員会によって選出され、本会の評議員選挙を管理する。
 - (2) 編集委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され、会誌その他の印刷物の編集に当る。
- 第9条 本会の経費は会費その他の収入をもってあてる。
- 第10条 本会の会務執行に必要な規定は別に定める。

土壤の物理性 第27号

(会 員 配 布)

1972年11月25日 発行

発 行 土 壤 物 理 研 究 会

埼玉県鴻巣市大字鴻巣1227

農事試験場内

電 話 0485-41-1231

振替口座 東京 17794