

Soil Physical Conditions and Plant Growth, Japan

土 壌 の 物 理 性

第 19 号

昭和 43 年 10 月

卷 頭 言	田 原 虎 次	1
コーン指数に関する 2, 3 の考察について	吉 田 勲	3
放牧草地の土壌の物理性について	高 畑 滋	8
土壌空気と作物の生育	森 哲郎, 小川和夫	13
陽荷電合成高分子の作用について	横 井 肇	20
土壌水運動理論の諸系列 (3)	中 村 良 太	23
土壌水運動理論の諸系列 (4)	田 淵 俊 雄	28
会 務 報 告		37
土 粒 子		7
編 集 後 記		38
10周年記念シンポジウム講演要旨		39

土壤物理研究会会則

- 第1条 本会は土壤物理研究会と称する。
- 第2条 本会は土壤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 土壤の物理性 (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の3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 | 500円 |
| 学生会員 | 〃 | | 300円 |
| 賛助会員 | 1口 | 年額 | 10,000円 |
- 第6条 本会に次の役員をおく。
- 会長1名、副会長1名、評議員、会計監事若干名及び幹事若干名。幹事以外の役員の選出は総会において行なう。幹事は会長の委嘱による。役員任期は2年とする。但し再任をさまたげない。
- 第7条 会長は毎年1回以上総会並びに評議員会を招集する。
- 第8条 本会の経費は会費その他の収入をもってあてる。
- 第9条 本会の会務執行に必要な規定は別に定める。
- 付 本会の事務局は当分の間下記におく
- (昭和42年4月以降)
- 東京都文京区弥生1の1の1
東京大学農学部農業地水学研究室内

「土壤の物理性」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、その内容は土壤の物理性に主体をおくものとする。
- 〈報文〉 他誌に未発表のものに限る。書き方は方法、結果、考察ならびに総括(摘要)の体裁をとり、引用文献を明らかにすること。
- 〈論説・綜説〉 土壤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	
表題		図表数	図枚、表枚
著者名		写真数	葉
所属		別刷	30部+ 部

- (6) 別刷は30部を著者に贈呈する。それ以上希望する場合は実費を申し受ける。
- 付記：投稿及び会誌編集に関する通信は下記宛のこと
東京都文京区弥生1の1の1 東京大学農学部農業地水学研究室内土壤物理研究会編集委員会

巻頭言

相互理解と土壌物理研究会

田原 虎次 (東京農工大)

先般行なわれた第9回土壌物理研究会シンポジウムでおもしろく感じたことだが、話題提供者や討論者の間で使われる「新しい、古い」、「はやい、おそい」など時間に関して、ある人は万あるいは千年、また、年を単位としているのに対し、他の人は秒以下の単位を基準としてものをいっており、言葉だけ聞いているとナンセンスな感じすらした。しかし、シンポジウムはきわめて真剣に、なんの破綻もなく多大の成果をあげて終わったのである。このような成果は参加した人々の間に相互理解があり、その理解の上に立って意見の交換があったればこそできたのであって、さすがは土壌物理研究会だと意を強くした。

土壌というものはきわめて多面的であり、したがって、これに関する学問も多面的である。その一面は土壌それ自身が研究の対象であり、目的とする学問分野である。他の面としての第1は、生産資材としての土壌、第2は生産の媒体としての土壌等々。それぞれの面に立つ学問分野まことに広いものである。したがって、各専門分野ごとに土壌に対する感覚が異なるのは当然といえよう。科学技術の進歩にともなって土壌の性格も複雑多岐化してくる。そしてせまく分化した専門分野の知識だけでは処理しきれなくなり、やがて進歩も止まってしまう。このような事情は土壌に関する特定の専門分野だけに限られたものではなく、多くの分野が同じなやみを生じてきたものと考えられる。この隘路を打開する方法としては先進他部門の知識の吸収をはかるに止まらず、相互に知識を交換し、ともに考え、協力して問題の処理にあたるという体制がよいとされている。そもそも土壌物理研究会はこの趣旨によって設立されたものであるということは言をまたない。

この趣旨が正しく生かされているかぎり、会員の中に土壌に対する感覚が違っていても何等案ずることはない。否、それぞれの専門分野ごとに違うのが当然であろう。ただ、会員として共通するものは深い相互理解があるということであろう。その意味では会員間の相互理解こそ土壌物理研究会の生命といっても過言ではあるまい。

上述のように第9回シンポジウムは多大の成果をあげたのであるが、必らずしも十分だったとはいえ

ない。一口に相互理解をするといっても、それは決して安易なことではない。さらに理解を深めることは困難なことである。しかし、今日の土壌に関する学問の事情からして、相互理解の努力を怠ることは、みずからの学問の停滞を許すことになる。なんとしてもその努力をせねばならない時代となった。筆者も含めてお互いに会員相互で理解につとめるよう努力せねばならないし、本研究会の運営もこれを助長すべく工夫されねばなるまい。

(43. 8. 22)

コーン指数に関する2,3の考察について

吉 田 勲*

1. 緒 論

筆者など¹⁾は水田の地耐力を判定する一手段として、WESなどで軟弱地盤上における車両のトラフィカビリティ判定に使用されているコーンペネトロメータを使った。本機は円錐を貫入棒の先端につけ、土中に押し込み、乱さない土のコーン指数を求めるものである。コーン指数とは押し込みに要した力 P kg をコーン断面積で除した値である。コーン指数とは一体何を意味するか現在のところ不明である。そこで筆者はコーン指数の意味解明の一歩として、コーン貫入により乱される土の範囲、コーン指数 (I_c) と圧縮指数 (C_c)、一軸圧縮強度 (q_u)、乾燥密度 (γ_d)、湿潤密度 (γ_t)、含水比 (W)、間げき比 (e) などの諸相関関係を土質を変えて調べた。また、筆者の使用したコーン断面積は 3.2cm^2 であり、このコーンで求めたコーン指数 (I_{c3}) と他の良く使用されている断面積 6.5cm^2 で求めたコーン指数 (I_{c6} , いずれも先端角 30°) との関係も土質を変えて求めた。

2. 実験と考察

1) コーンの影響範囲

コーン貫入により影響される範囲を知ることはコーン貫入間隔を知る上にも重要なことである。そこで筆者はコーンの影響範囲を知るために、粒径 $0.075\sim 2.00\text{mm}$ の砂を用いて以下のような実験を行なった。

実験には縦 30cm 、横 40cm 、奥行 3cm の片面ガラス張りの実験槽を作り、ガラスに 1cm 間隔でソウメンを張りつけ、実験砂を入れ、先端角 $\beta=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 124^\circ, 180^\circ$ の模型コーンを貫入し、その時の土の挙動を写真にとり、2次元的に解析した。1例として、

写真-1に先端角 $\beta=180^\circ$ のコーンを $\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$ 、 $W=31.1\%$ の状態の砂に貫入した場合を示す。実験より得た写真をもとに、 X をコーン中心より水平方向の最大影響距離、 Y をコーン先端より垂直方向の最大影響距離として、コーン先端角 β によ対し X/r 、 Y/r (r : コーン

の半径) を図-1に示す。図-1(a)は $\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$ 、 $W=3.11\%$ 、(b) 図は $\gamma_d=1.34\text{g/cm}^3$ 、 $W=0$ の場合の試験結果を示す。図より、 X/r 、 Y/r の両曲線は $\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$ のとき、 $\beta=60^\circ$ 、 $\gamma_d=1.34\text{g/cm}^3$ のとき $\beta=90^\circ$ で交っている。両図より $\beta=60^\circ\sim 90^\circ$ より右側では側方に対する影響範囲は垂直方向に対する影響範囲は垂直方向に対するそれよりも少く、左側では逆になって

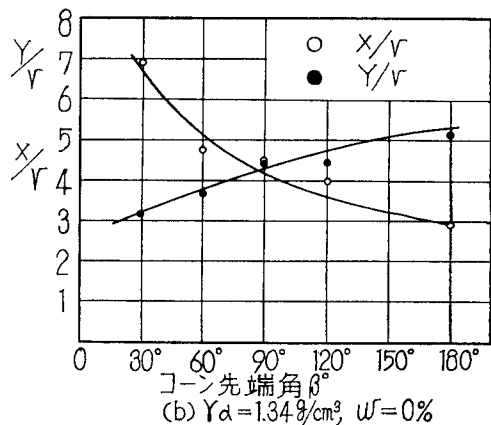
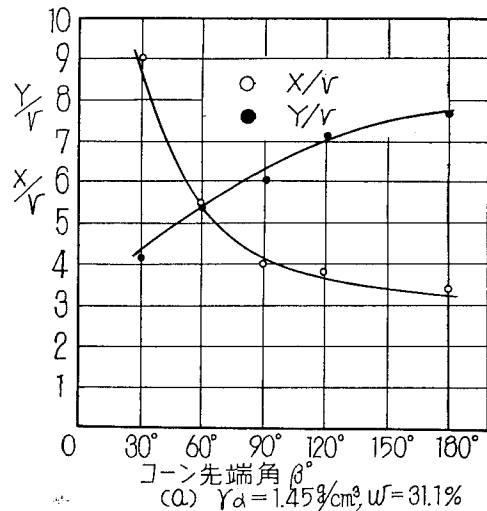


図-1 コーン貫入により影響される範囲 (砂地盤の場合)

* 九州大学農学部

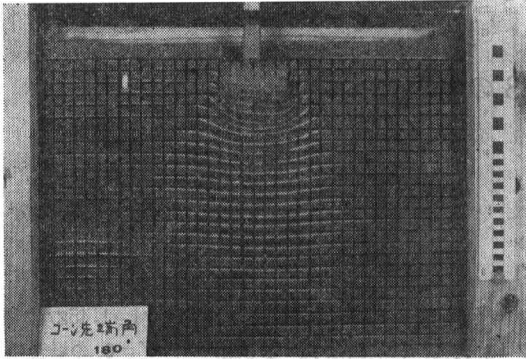


写真-1 粒径0.075~2mmの砂 ($\gamma_d=1.45\text{g/cm}^3$, $w=31.1\%$) 中に先端角 $\beta=180^\circ$ のコーン貫入時の砂の挙動

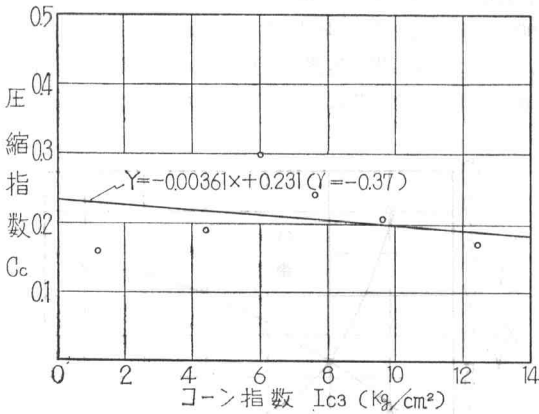


図-2 コーン指数と圧縮指数の関係 (砂質粘土ローム, 九大人工ホ場土)

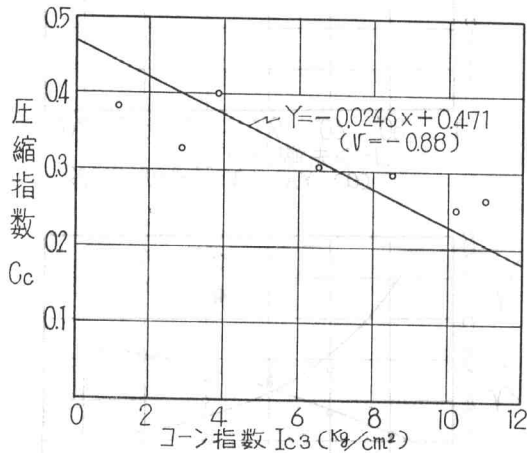


図-3 コーン指数と圧縮指数の関係 (砂質粘土ローム, 九大人工ホ場土)

いる。ゆえに $\beta=60^\circ\sim 90^\circ$ の右側では圧縮型, 左側では側方流動型と呼んで良いと思われる。筆者等の使用しているコーンの先端角は 30° であるから側方流動型に入り, 図より最大影響範囲は $X/r=9.0$, $Y/r=7.7$ となる。したがってコーン貫入時の水平間距離は少くとも半

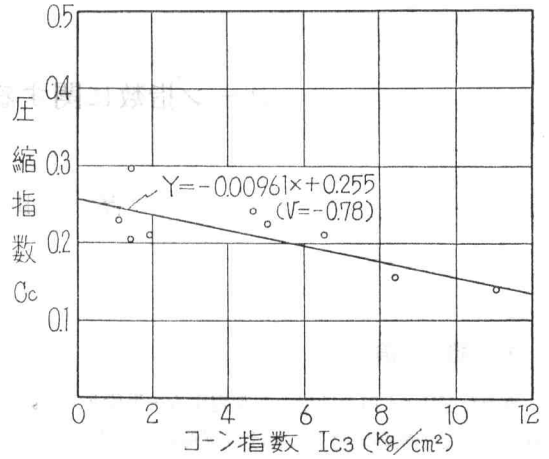


図-4 コーン指数と圧縮指数の関係 (シルト質粘土ローム, 三滞沖積土)

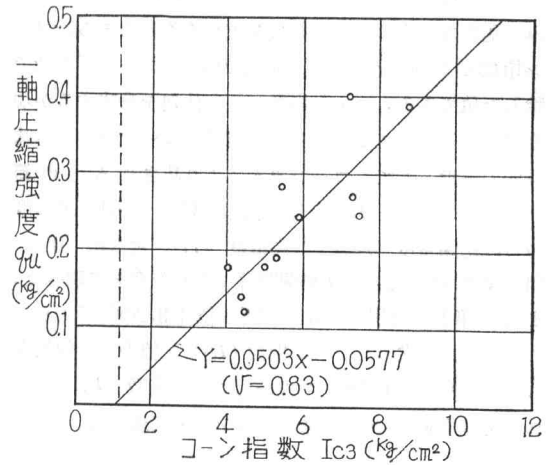


図-5 コーン指数と圧縮指数の関係 (砂質粘土ローム, 九大人工ホ場土)
図中の点線はペネトロメータ自重による適用限界で $I_c=1.112\text{kg/cm}^2$ である

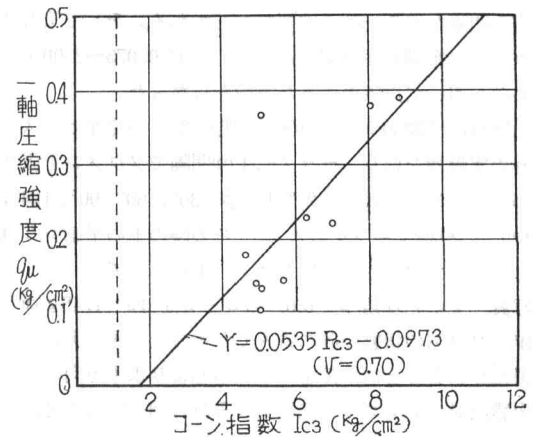


図-6 コーン指数と圧縮指数の関係 (粘土質 (ローム, 九大人工ホ場土))

表-1 コーン指数と圧縮指数

土性	X	Y	標本数	相関係数	$\rho=0$ の検定	回帰直線	備考
砂質粘土ローム (九大人工ホ場) 粘土質ローム (九大人工ホ場) シルト質粘土ローム (三潞沖積土)	コーン指数 $I_{c3}(\text{kg/cm}^2)$	圧縮指数 c_c	9	-0.37	1.053	$Y = -0.0361X + 0.231$	$t_{0.05} = 2.365$
			7	-0.88	4.413 非常に有意	$Y = -0.0246X + 0.471$	$t_{0.01} = 4.032$
			10	-0.78	3.524 非常に有意	$Y = -0.0096X + 0.255$	$t_{0.01} = 3.355$

表-2 コーン指数と一軸圧縮強度

土性	X	Y	標本数	相関係数	$\rho=0$ の検定	回帰直線	備考
砂質粘土ローム (九大人工ホ場) 粘土質ローム (九大人工ホ場) 砂質ローム (九大人工ホ場)	コーン指数 $I_{c3}(\text{kg/cm}^2)$	一軸圧縮強度 $q_u(\text{kg/cm}^2)$	11	0.83	4.470 非常に有意	$Y = 0.0503X - 0.0577$	$t_{0.01} = 3.250$
			10	0.70	2.771 有意	$Y = 0.0535X - 0.0973$	$t_{0.05} = 2.306$
			18	0.70	3.920 非常に有意	$Y = 0.0525X - 0.1013$	$t_{0.01} = 2.921$

表-3 I_{c6} , I_{c3} の土性別相関関係

土の分類	標本数	相関係数	回帰直線
三潞沖積土* (福岡県)	110	0.78	$I_{c6} = 0.705I_{c3} + 0.091$ $I_{c6} = 0.705I_{c3} + 0.091 \pm t\sqrt{(0.039 - 0.0188I_{c3} + 0.00294I_{c3}^2)0.904}$
砂質粘土ローム (九大人工ホ場)	106	0.80	$I_{c6} = 0.792I_{c3} + 0.466$ $I_{c6} = 0.792I_{c3} + 0.466 \pm t\sqrt{(0.076 - 0.026I_{c3} + 0.00255I_{c3}^2)1.347}$
粘土質ローム (九大人工ホ場)	110	0.76	$I_{c6} = 0.735I_{c3} + 0.637$ $I_{c6} = 0.735I_{c3} + 0.637 \pm t\sqrt{(0.071 - 0.0288I_{c3} + 0.00336I_{c3}^2)1.703}$
砂質ローム (九大人工ホ場)	102	0.89	$I_{c6} = 0.776I_{c3} + 0.546$ $I_{c6} = 0.776I_{c3} + 0.546 \pm t\sqrt{(0.066 - 0.0169I_{c3} + 0.00127I_{c3}^2)1.195}$
粘土質ローム (九大人工ホ場)	102	0.89	$I_{c6} = 0.799I_{c3} + 0.120$ $I_{c6} = 0.799I_{c3} + 0.120 \pm t\sqrt{(0.046 - 0.0146I_{c3} + 0.00144I_{c3}^2)1.126}$
砂質ローム (佐賀県小城市水田土)	93	0.78	$I_{c6} = 0.664I_{c3} + 0.559$ $I_{c6} = 0.664I_{c3} + 0.559 \pm t\sqrt{(0.046 - 0.0204I_{c3} + 0.00296I_{c3}^2)1.046}$

* 三潞沖積土は 粘土, シルト質粘土ローム, ローム, シルト質ローム, 砂質ローム等の種々の土よりなっているが, 中でもシルト質粘土ロームが多い。

tは, スチューデント数

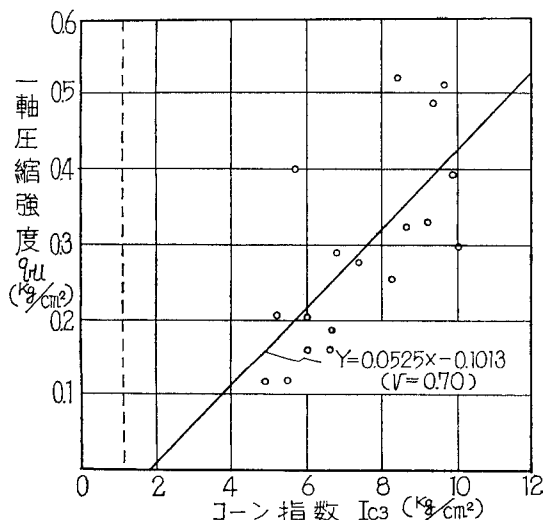


図-7 コーン指数と圧縮指数の関係(砂質ローム, 九大人工ホ場土)
図中の点線はペネトロメータ自重による適用限界で $I_{c3} = 1.112 \text{kg/cm}^2$ である

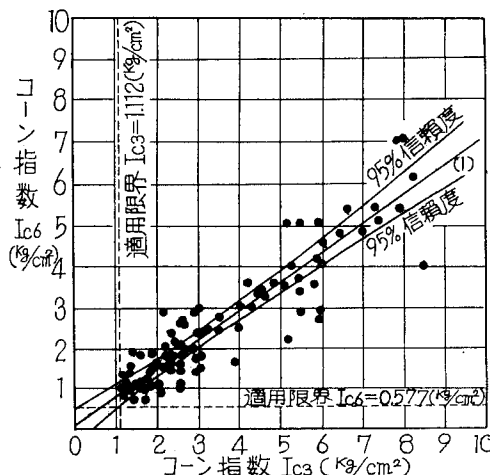


図-8 I_{c6} と I_{c3} の相関, 三潞ホ場における I_{c3} と I_{c6} の相関

(1) $I_{c6} = 0.705I_{c3} + 0.09$

図中の点線はペネトロメータ自重による適用限界 $I_{c6} = 0.577 \text{kg/cm}^2$ $I_{c3} = 1.112 \text{kg/cm}^2$

径の9倍はなれていることを要す。以上は0.075~2mmの砂を用いた試験結果であり、粘性地盤にそのまま適用するには問題もあるが一応の目安となると考える。

2) コーン指数と圧縮指数

3種類の土をバケツの中で水を混ぜ、かくはん機でドロドロにし、自然乾燥させて、種々の強度の試料を作り、圧縮試験機を使用して圧縮指数を求めた。実験結果をもとに、横軸にコーン指数 (I_{c3})、縦軸に圧縮指数 (C_c) をプロットすると図-2~4となった。各回帰直線、相関係数 (r) を求めると表-1となる。いま相関係数の有意性を検定すると(表-1) 使用した試料のうち砂質系の土の場合、相関が見いだせなかった。

3) コーン指数と一軸圧縮強度

2) で使用した土を現場にて、thinwall tube で採土し、その近くでコーン指数を測定した。実験室にて、一軸圧縮試験を行ない、一軸圧縮強度 (q_u) とコーン指数との相関を求めると表-2のごとくなり、各々の土で相関が認められた。

4) コーン断面積 3.2cm², 6.5cm² の相関

コーン断面積 3.2cm², 6.5cm² で求めたコーン指数をそれぞれ I_{c3} , I_{c6} とし、6種の土につき相関関係を調べると表-3のようになった。

いま、 I_{c3} , I_{c6} との関係を次式で表わせるとする²⁾。

$$I_{c6} = AI_{c3} + B \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 A , B は係数

土質により係数 A , B は異なり、表-3より、砂質ロームで $A=0.6\sim 0.7$, $B=0.5\sim 0.6$, 粘土質ロームで $A=0.7\sim 0.8$, $B=0.1\sim 0.6$, 砂質粘土ロームで $A=0.8$, $B=0.5$ 位となる。図-8に三瀧ホ場における I_{c6} と I_{c3} の相関を示す。表-3の三瀧ホ場における I_{c6} , I_{c3} の関係式より求めた I_{c6} と実測した I_{c6} との差のばらつきは I_{c3} が大きくなるにつれて増大することは図-8よりわかる。コーン指数測定の精度は個人によりまちまちであることは容易に推測出来る。この原因の一つとして個人の体重の差があげられる。測定精度は、その人がいかにスムーズにコーンを貫入出来るかにかかっているの

である。そこで人間によりコーンをなめらかに貫入可能な上限を体重/断面積とする。いま 60kg の人の測定可能な最大コーン指数を求めると $60/3.24 = 18.52 \text{kg/cm}^2$ となる。この値を表-3の各式に代入し、信頼係数90%, 80% ($t_{0.10}$, $t_{0.20}$) の場合の信頼区間を求めると表-4となる。したがって、表より10回に1回の例外を除くとコーン指数のパラツキは ± 1.429 の範囲内にある。

表-4 I_{c3} による I_{c6} 推定の信頼区間

土 性	信 頼 区 間	
	信頼係数=10%	信頼係数=20%
三瀧沖積土(福岡県)	± 1.320	± 1.025
砂質粘土ローム (九大人工ホ場)	± 1.257	± 0.976
粘土質ローム(九大人工ホ場)	± 1.429	± 1.110
砂質ローム(九大人工ホ場)	± 1.461	± 1.134
粘土質ローム(九大人工ホ場)	± 0.917	± 0.712
砂質ローム(佐賀県)	± 1.044	± 0.811

5) 乾燥密度, 湿潤密度, 間げき比, 含水比とコーン指数との関係

三瀧ホ場で採土した49の標本をもとに γ_d , γ_t , e , w と I_{c3} との相関を調べると表-5のようになった。相関係数 r の有意性検定より、湿潤密度を除き、他はすべて、 I_{c3} と高い相関が認められた。

3. 結 論

以上のことから以下のことが要約出来る。

- a) 砂にコーン貫入した場合の土の挙動によりコーンの型を分けると圧縮型と側方流動型に分類出来る。この境界の角度は $\beta = 60^\circ \sim 90^\circ$ である。 $\beta = 30^\circ$ のコーンの最大影響範囲は $X/r = 9.0$, $Y/r = 7.7$ である。
- b) コーン指数と圧縮指数とは粘質土で有意な相関が認められた。
- c) 一軸圧縮強度とコーン指数の間にも全試料土につき相関があった。
- d) I_{c6} と I_{c3} の間には(1)式のような関係があり、係

表-5 コーン指数 I_{c3} と乾燥密度, 湿潤密度, 含水比, 間げき比の相関関係(三瀧ホ場土)

X	Y	相関係数	$\rho=0$ の検定	回 帰 直 線	備 考
コーン指数 I_{c3} (kg/cm ²)	乾燥密度	0.68	6.362 非常に有意	$Y = 0.022X + 0.962$	$t_{0.01} = 2.689$ $t_{0.05} = 2.017$
	湿潤密度	0.10	0.692	$Y = -0.002X + 1.67$	
	含水比	-0.65	4.456 非常に有意	$Y = -1089 X + 59.59$	
	間げき比	-0.71	6.911 非常に有意	$Y = -0.043X + 1.560$	

注 三瀧ホ場土は粘土, シルト質粘土ローム, ローム, シルト質ローム, 砂質ローム等種々の土よりなっているが, シルト質粘土ローム, 粘土質ロームが中でも多い。

数 a , b は土により異なる。

以上コーンペネトロメータにより求めたコーン指数 I_{c3} と土の諸性質との相関を調べた。コーンペネトロメータは使用が簡単であり、しかも深いところの土の性質を乱すことなく、現場で測定できる特点がある。しかし測定には押し込み速度の不一致による測定誤差が入ってくる。これをなくするためには一定速度で貫入させる手

段が必要である。今後はコーンの角度、断面積、貫入速度などの諸関係を究明したい。

参考文献

- 1) 藤川武信他3名：ホ場地盤の含水率と機械の走行に関する研究，九大農土質理工学研報第12号
- 2) 同上

土 粒 子

第9回国際土壤学会に出席して

4年に1回の間隔で開かれる International Congress of Soil Science はその第9回をことし(1968年)の8月南オーストラリアの Adelaide で開催したが、筆者はたまたまそれに参加する機会を得、世界各国から集まった土壤学者の研究発表をそこで親しく見かつ聞くことができた。内容の報告は別に投稿させて戴くとしてここではその時の印象の一部をとりあえずお伝えしたい。

ひとくちに云って Soil Physics は数ある Soil Science の分野の中では biology と並んでいま最も活気ある部門という感じをうけた。これは本誌が土壤物理研究会の機関誌だと云うのでそれにおもねって云うのでは無論ない。

筆者の耳に間違いがなければ開会式当日の ISSS 会長の冒頭演説でもそのことが強調されたし、7日間に亘る会議に発表された300余りの論文のうちその3分の1が土壤物理に関係をもつものであったこともその証拠であり、また、発表と討論の模様をあちこち拾い歩きして聞

いた筆者の体験からもそれはまさに実感であった。

土壤ならびに作物における水の移動の問題で30題、吸水と保水の問題で6題、カンガイ排水における土壤とその Salinity の問題で15題、土壤構造と Polymer の問題で3題、界面の物理化学の問題で20題、土のかたさと根の伸長の問題で9題、測定手段の問題で6題、これに耕耘や作付や施肥・放牧など管理の段階で生じる土壤物理の諸問題で14題、これがその内訳であるが近年の世界の土壤物理研究の趨勢がおよそどの辺にあるかもこれによってほぼ察しがつくであろう。

筆者はこれらの話を聞いているうちに水田を中心に考える我が国の農業技術研究の特異性を次第にはっきりと思い知らされ、その特異性を生んだ背景にも思い至らざるを得なかったが、一方土壤物理でその分野を充実させてゆく力はわれわれこそがもっているのだという自信が同時に心に湧いてきたのも事実で、これはこの分野から初参加した者にとって一つの貴重な収穫であった。

(東大農 八幡敏雄)

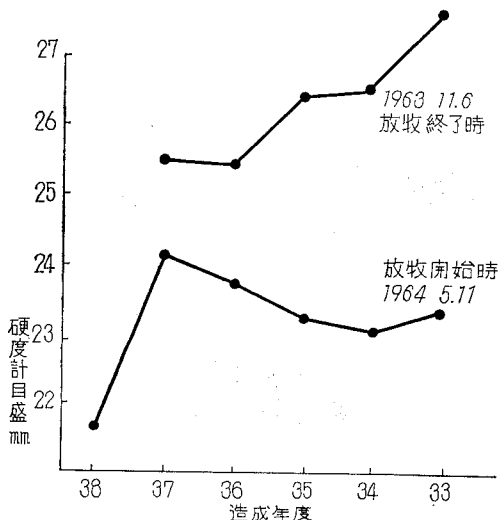
放牧草地の土壌の物理性について

高 畑 滋*

1. はじめに

永年草地では土壌を耕起することがない。さらに放牧用草地であればその上に家畜による踏圧が加わり、一種独特な土壌の状態を示すようになる。このような草地土壌の特異性は、同じ耕地土壌のなかでも、栽培林地、畑地、水田土壌などの分類と同じレベルにあるものとみられる。草地土壌の特質の大部分のものが、不耕起であることと、家畜の踏圧とにその原因が考えられるので、放牧草地の土壌の物理性を問題にすることは、草地土壌の本質の究明に近づく筋道であると思われる。

草地は一種の迂回生産の場であり、牧草の収穫が最終目標ではなく、それを利用した家畜の生産が目的となっている。そのため草地の評価を正しく行なうことがむずかしく、研究の立ち遅れもこの面からきている。家畜との関係においてはじめて存在する草地では、もっと「踏みかため土壌」に対する研究がすすめられてもよいのではないかと思ひ整理してみた。各分野からの助言がいた



図一 栃木県酪農協大笹放牧場表層土壌の硬度

* 北海道農試 草地開発部

表一 土 壤 硬 度 kg/cm^2

区 深 さ	NZ 禁 牧 区	NZ 放 牧 区	永年刈取草地	トウモロ コシ 畑
	0cm	1.0	2.0	2.0
5	0.9	1.6	1.9	0.7
10	0.5	1.6	1.7	0.4
15	0.4	1.1	1.3	2.5
20	0.6	0.5	1.6	1.8
25	0.7	0.6	0.9	1.2

草地開発部 (1964)¹⁾表二 Bulk density g/cm^3

Site depth	A		B		C		D	
	禁牧区	放牧区	禁牧区	放牧区	禁牧区	放牧区	禁牧区	放牧区
0-3	*0.77	0.93	*0.72	0.93	1.05	10.2	*0.42	0.98
2-4	*0.88	0.97	*0.88	1.02	1.17	1.17	1.07	1.10
Silt+ clay	73		79		54		68	

Howard, K. O. (1960)²⁾表三 Average bulk density of soil at various depths in swale and upland locations sampled in early and late summer, 1962 (ovendry soil g/cc).

Location and depth (inches)	Grazed plots		Exclosures	
	Early	Late	Early	Late
SWALE				
0-1	0.65	1.03	1.02	1.01
1-2	1.01	1.06	1.04	1.08
2-4	1.07	1.11	1.10	1.12
4-6	1.12	1.14	1.14	1.18
Ave.	1.04	1.08	1.08	1.10
UPLAND				
0-1	1.19	1.22	1.11	1.19
1-2	1.20	1.24	1.12	1.19
2-4	1.20	1.26	1.20	1.24
4-6	1.22	1.24	1.19	1.23
Ave.	1.20	1.24	1.16	1.28

Laycock, W.A.; Conrad, P.W. (1967)³⁾

できれば幸いである。

1) 土壌硬度

現地でもまず第一に観察されるのが土壌硬度であるが、当然のように放牧によって著しく高まる。図一の大笹放牧場は、毎年牧草地を拡張して牧柵で仕切らない全期

表-4 16年目の草地

		放牧地	採草地
容積重 g/100cc		147.7	126.0
真比重		2.5	2.5
土壤三相	固相 %	42.5	35.0
	液相 %	41.5	39.7
	気相 %	16.0	25.3
孔ゲキ率 %		57.5	65.0
非毛管孔ゲキ %		0.7	4.5
飽水度 %		72.2	61.1
容気度 %		27.8	38.9
硬度 (目盛)		23	20

1966.9.2 狭松村 S25年造成

て、古い草地ほど幅が広いようである。草地には、sod bound とよばれるマット状の細根の層ができるが、これがある程度、踏み

放牧であったので、
 一緒に放牧されてい
 るとみれば、年次
 の変化がつかめるこ
 になる。これによ
 れば、放牧がくりか
 えされるに従って、土
 壤硬度が増すが、越
 冬後春先にはそれが
 戻る。その戻りかた
 に年次の差があっ

て、古い草地ほど幅

表-5 牧草地土壤の耐水性団粒 (粒団百分率)

	>2.0 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.2 mm	0.2~0.1 mm
初年目	2.21	3.35	9.07	12.88	3.22
2年目	3.71	4.92	8.42	11.55	1.21
3年目	2.82	6.25	11.51	10.66	2.08
8年目	6.03	9.25	9.86	0.80	6.74
16年目	13.89	13.03	9.47	2.41	2.41

表-6 土壤構造の安定度 (通気係数/透水係数)

層位	普通作物	原野	牧草地
上層	2.40	1.79	1.36
下層	1.63	1.58	1.15

透水係数は、24時間浸水後のものについて測定

かための緩衝体となっているようである。放牧草地でなくともトラクタが毎年入る採草地でも古くなれば同じように硬度が増す(表-1)。

2) 密度

一般には放牧によって土壤密度が高まるが、土壤によっては、密度が増さないという報告もある。表-2では砂の含量が多いと bulk density は放牧によっても増えていない。

3) 土壤三相

表-4は、造成後16年を経過した草地での測定値であるが、同じ年に造成して、以後ずっと放牧と牧草とにわけて利用している隣接する圃場なので放牧の影響を知ることができよう。これによれば、固相と液相が増し気相が減るとい特徴があらわれている。図-3は北海道土幌町の国営大規模草地のものであるが同じ傾向がみられる。図-4は、放牧法の試験圃場のデータで、放牧強度が増すに従って前記特徴がよくあらわれる。これも、一年間のうちでは、放牧期の終りに高く、春には戻る傾向があり、年数と放牧強度とによってある平衡に達するようである。

4) 土壤水分

ある土壤では固相が増せば、液相が増すことが知られている。また、これは構造が変わって間隙の性質変がるからだろうが、有効態水分量も増す。通気係数/透水係数を土壤構造の安定度を示すものとして、永田が栃木県那須で測定した結果によれば草地土壤は非常に安定した構造を持つといえる(表-6)。しかし、間隙の減少に伴って浸透能は明らかに減少するから、降水を保持する割合は少くなるが、それを長い間、植物に有効なかたちで保持する能力は強いということになる。

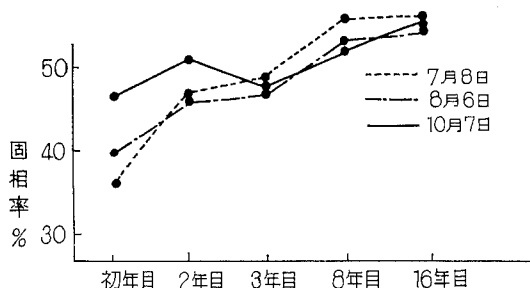


図-2 チモシー草地固相率の変化表層5cm 早川(1961)⁴⁾

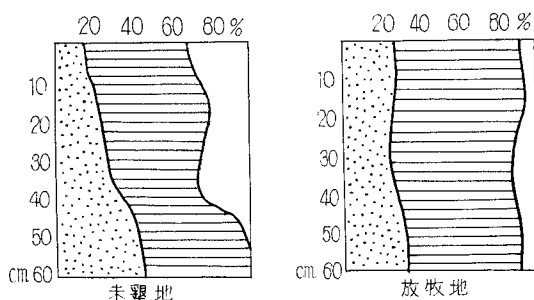


図-3 十勝中部大規模草地⁵⁾

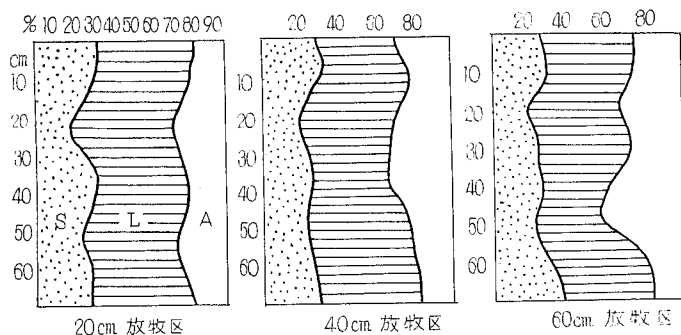


図-4 草タケ別放牧試験地

一般に放牧草地は、軽しような火山灰台地に多く分布するが、このような火山灰土壌では固相が20%以下というきわめて過粗な状態がみられる。踏みかたがめが牧放の生育にプラスに働いたという結果が過粗な土壌ではふつうである。これは、圧密処理を加えた試験として人工的にも観察されたが、圧密により土壌水分が多くなること、土壌中の養分密度が高まること、溶脱が抑えられるなどの効果が考えられている。

5) 通 気

踏みかためにより気相が減るが、気相を場として行なわれる通気がどのように変化するか、また、土壌における通気が作物の生理上どんな意味を持つのか知見は少ない。土壌空気を窒素ガスによっておきかえた実験では、他の作物は減収したのに、イタリアンライグラスは逆にわずかに増収したとさえいわれる。地表面をパラフィンで被覆して消極的に通気を抑えたものでも、イタリアンライグラスは影響を受けずに生育することができた。

気相率の低下が作物生育の制限因子になるとして、気相率の下限を論じた報告もあるが正確な下限とはいえない。それは、土壌によって同じ気相率でも意味がちがうからで、より作物生育に関係のある「通気」の状態について問題にしなければならない。今までに通気係数とか相対拡散係数 D/D_0 などが測定されたが、まだ作物生育の上での意味づけは行なわれていない。また、牧草根のなかには、水稻のような沼沢作物にみられる根の皮層の部分が崩壊し gas の通導に有利な形態になっているものが多くみられることから、土壌の通気性の必要性が少なくとみられる。このような根の形態は、通気不足に対

表-7 Soil moisture in virgin and grazed prairie.

Station	Deci-meter horizons	Wilting * coefficients	Moisture percent		
			Mar. 17	Apr. 28	June. 10
Virgin prairie	1 st	8.7	20.4	12.3	3.3
	2	8.1	19.9	13.8	5.9
	3	7.7	19.2	14.6	8.7
	4	8.7	19.3	14.9	9.3
	5	8.2	18.6	15.3	9.0
	6	8.4	18.4	15.8	9.4
	7	8.1	17.0	15.8	9.7
	8	8.0	17.4	15.8	10.7
	9	7.5	17.4	16.0	11.1
	10	7.0	17.1	16.0	11.6
Grazed prairie	1 st	8.8	32.2	28.0	6.4
	2	9.7	33.0	26.0	8.5
	3	8.4	30.2	26.6	8.1
	4	7.9	33.8	27.4	9.2
	5	7.0	37.4	29.5	11.0
	6	7.2	39.4	29.8	12.0
	7	7.9	40.0	25.0	13.4
	8	8.2	26.8	24.3	16.3
	9	9.3	23.6	29.7	16.6
	10	9.5	27.6	21.9	17.1

* Calculated from the hygroscopic coefficients Daubenmire, R.F. and Colwell, W.E. (1942)⁹⁾

表-8 牧草地土壌の酸化還元電位の推移 (E_h, mV) (早川 1961)

測定した月	初年目	2年目		3年目		8年目	16年目
		チモシ一畑	クローバ畑	チモシ一畑	クローバ畑	チモシ一畑	チモシ一畑
6月	550	430	440	390	450	250	200
8月	520	410	460	370	420	270	230

表-9 放牧が根の形態におよぼす影響

		Branch 1st 6 in	No. roots per sq in	Diam. mm
Aristida glabrata	prot grazed	14.0* 8.5*	9.5 9.5	0.92 1.32
Beulelova curtispindula	prot grazed	100.5* 84.3*	15.5* 11.7*	0.83 0.83
B. filiformis	prot grazed	86.0* 53.0*	29.0* 11.2*	0.36 0.37
Trichachne californica	prot grazed	80.0* 32.0*	14.0 10.5	0.66 0.57

* Significant difference at 0.05 confidence level J. Blydenstein (1966)⁷⁾

表-10 Mean numbers of grassstillers and clover nodes per sq. ft.

	Perennial ryegrass	White clover	Poa spp.
Not trodden	220	120	140
Moist Soil 6 sheep	270	120	160
" 9 "	280	140	120
" 12 "	290	100	160
" 18 "	230	120	140
Wet soil 3 "	210	130	150
" 6 "	190	110	140
" 9 "	180	110	120
" 12 "	190	90	70
" 18 "	120	100	70
Standard error ±	34	14	16

D. B. Edmond (1962)⁸⁾

する一つの適応形態とみられるので、さらにレベルをかえて試験する必要があろう。

通気不足は、土壌をある程度還元状態にするが(表-7)、このことが養分の可給化や不可給化にどの程度影響を与えているのか興味のあるところである。少なくとも北海道に広く分布する新しい火山灰土壌では還元により磷酸は可給化される割合が高くなるという。

6) 牧草生育との関係

以上の土壌物理性の諸変化は、結果として牧草の生育に影響をおよぼすのだが、適度の放牧であれば、土壌密度、水分、通気の変化は牧草に対して良い適応形態をとらせ、草丈短く、草生密度高く、活力ある太い根を出すなどの現象がみられた。

放牧草地では高い収量を指向することは、他の要因からみて許されない。放牧地の草の上に家畜がのって採食

表—11 圧密処理が土壌の物理性および牧草の生育におよぼす影響

Nominal topsoil density (g/cc)	Plant growth characteristics (mean figures for an individual plant)					Soil measurements*	
	Leaf No.		Tiller No. at end of trial	Green wt (g)	Dry wt(g) and S.E.S	Currents to platinum electrode (micro-amps)	
	middle of trial	end of trial				beginning of trial	end of trial
1.00	4.0	10.3	4.5	.455	.087±007	10.0±1.6(3)	4.6±0.5(8)
1.05	4.0	9.3	3.8	.346	.074±007	7.5±1.6(3)	3.1±0.5(8)
1.10	3.2	7.2	3.2	.295	.066±007	5.4±1.6(3)	2.0±0.5(8)
1.13	2.8	5.2	2.2	.108	.029±003	3.0±0.3(3)	1.4±0.2(8)
1.17	3.2	6.7	2.8	.222	.053±003	1.5±0.3(3)	1.8±0.2(8)
1.20	2.8	3.5	1.2	.082	.024±003	1.4±0.3(3)	1.1±0.3(6)

*Soil measurements

Core-test results on surface 4 cm of soil

Soil dry density (g/cc)	Air-space % of soil volume		Soil moisture content (dry weight basis %)	Intrinsic gas diffusivity (D/Do)
	Measured on cores	calculated from nominal density		
1.00	16.8	21.4	38.9	.026
1.08	7.2	10.6	45.4	.002
1.14	8.7	13.0	39.4	.004
1.16	1.8	4.7	44.7	.001
1.22	5.4	8.9	38.1	.003
1.20	6.4	14.0	31.9	.001

Gradwell, M. W. (1964)⁹⁾

表—12 Results of trial with established ryegrass Plants (Planted 30 Sept. 1963; cut taken 6 Nov. : gas applied 8 Nov. ; cuts taken 17 Dec. and 3 and 30 Jan. (1964)

Dates of Measurement	Plant measurements			
	Top dry weight (g. means per plant)		Roots dry weight g./plant	
	Soil flushed with air	Soil flushed with nitrogen	Soil flushed with air	Soil flushed with nitrogen
6 Nov.	0.069	0.073		
Gas Applied here				
17 Dec.	0.137	0.142		
3 Jan.	0.051	0.049		
30 Jan.	0.078	0.081	0.286	0.206

(No difference in top weights was significant) (Difference in root weights was significant, P=0.02)

Gradwell, M. W. (1967)¹⁰⁾

するのであるから、採食しやすい高さ、踏み倒しによって無駄の多い草型などが望ましいわけで、これらは多収獲要因とは相反する。いままで、放牧が植生にはマイナスにしか働かないようにいわれていたのも、収量という点からだけみているので、その他の形質についてみれば、管理しやすい形になることがわかる。放牧によってもたらされる土壌の物理的な変化が、草丈短く、密度の高い草地を生み出していく過程について今後追究する必要がある。

7) その他の問題

草地を造成する場合にも条件によっては、不耕地でおこなうことが多い。野草地に牧草を定着させるのには、前植生の除去、牧草種子を土壌に密着させるなどの措置

が必要であるが、このような条件をいちどに満足させるものとして、家畜を放牧しながら播く、重放牧法とか蹄耕法といわれる簡易造成法がある。この方法では、家畜は造成の手段として使われるので、できるだけ早くあげたい。そのためには、土壌の物理性の面から、ストッキングの程度に対して一つの指標を与えられることが望ましい。

牧草が土壌侵食に強い作物であることは、広く認められているが、千ヘクタール規模の草地になるとまた問題になってくる。植生が密で土壌が放牧によって十分踏みかためられたような草地では、浸透能が極度に低くなり、少し降水量が多いと、表面流水がおびただしい量になることが観察されている。もし、過放牧などで地表面が露出していればたちまちガリー侵食を受けることになる。また、草地化した結果、牧場内の沢が干涸したという例も少なくなく、これは造成時にあらかじめ予想される浸透能から割り出して、必要な面積の水源涵養林をとらなければならないであろう。一つの牧場を設計し造り、維持していくということは、現在の農業の知識のすべてを必要とする大変大きな仕事である。道路一本にしても、家畜の習生や、乾草整製作業と無関係にできるものではなく、各分野の密接な連携があってはじめて可能なものである。今までのところ、農業土木の面からの視点が足りなかったように思われるので、関心を持っていただきたくて問題提起をした次第である。

なお、適切な指導とご校閲をいただいた草地第一研究室長早川博士に感謝する。

参考文献

- 1) 北海道農試草地開発部：Hoof cultivation 法による草地造成に関する試験成績（1964）
- 2) Howard, K. O. : Soil Porosity and Bulk density on Grazed and Protected Kentucky Bluegrass. Range in the Black Hills, Range Manage. 1380—86. (1960)
- 3) Laycock, W. A., Conrad, P. W. : Effect of grazing on Soil Compaction as measured by bulk density on a high elevation cattle range. Range Manage. 20, 3, 136—141. (1967)
- 4) 早川, 橋本：根釧地方火山灰地における牧草地土壌の理化学的特性とその施肥法に関する試験 第5報 北海道立農試集報第7号（1961）
- 5) 開発局土木試験所：大規模草地施行法土壌調査報告書：（1967）
- 6) Daubenmire, R. F., Colwell, W. E.: Some edaphic changes due to overgrazing in Agropyron-Poa Prairie of Southeastern Washigton. Ecology. 23, 32-42 (1942)
- 7) Blydenstein, J. : Root Systems of Four Desert Grassland Species on Grazed and Protected Sites. Range Manage. 19, 2, (1966)
- 8) Edmond, D.B.: Effects of Treading Perennial Ryegrass and white clover Pasture in Winter and Summer at two soil Moisture Levels. N. Z. J. Agric. Res. 6, 3, 265—76 (1963)
- 9) Gradwell, M. W.: Soil physial conditions of winter and the growth of ryegrass plants. I. Effects of compaction and Puddling. N. Z. J. Agric. Res. 8, 238—69 (1964)
- 10) Gradwell, M. W.: Soil physial conditions of winter and the growth of ryegrass plants. II Effects of soil Atmosphere. N. Z. J. Agric Res. 10, 425—435 (1967)
- 11) 高畑, 三井, 嶋村, 平野: 牧草地の播種床造成に関する研究. 第2報 牧草の生育に及ぼす土壌の粒団の大きさならびに土壌の圧密の影響, 畜試場報告, 15, 7-14. (1967)

土 壌 空 気 と 作 物 の 生 育

森 哲 郎*・小 川 和 夫*

1. はじめに

土壌構造によって規定される土壌の物理的要因のうち、作物の生育に直接関与するものには通気性・保水性・透水性・硬度・温度などがあり、これらの要因の中で、とくに通気性・保水性は土壌の空気量（空気組成）——水分量——硬度（凝集力・摩擦力）の関係に対して相互的に関連する要因として注目される。筆者らが研究の対象にしている東海地方の鉾質土壌畑では、作物は干害と湿害をうけやすい。それは、鉾質土壌の構造の発達がわるく、作物に対する水と空気の供給が円滑でないためであり、このことは、また土壌の耕耘をも困難にしている。したがって、鉾質畑土壌地帯では土壌の化学性を良好にすることと併行して土壌の物理的環境を作物の生

育に好適な状態に改善することが急務とされ、とくに通気性と保水性の増大は、土壌改良の大きな目標になっている。

そこで筆者らは、これらの鉾質土壌を対象にし、土壌の物理的要因と作物の生育との関係を明確化して、土壌改良あるいは適地条件の判定をおこなうための基礎的な資料をえようとしているが、これまでには、物理的要因として、とくに通気性の指標と考えられる土壌の空気量をとりあげ、この要因と作物の生育との関係を検討し、さらに作物の生育に大きく影響すると考えられる土壌中の窒素の形態変化あるいは有機物の分解と土壌空気・土壌水分との関係をもとめてきた。本稿では、それらの結果の概要をとりまとめ、資料として参考に供したいと思う。なお本稿の一部には、これまで未発表のものも

表-1 梅雨期における土壌空気量

ほ場番号	調査月日	1965・6・28		1965・6・29		1965・6・30	
		土壌空気量 (容積%)	容 積 重 (g/100ml)	土壌空気量 (容積%)	容 積 重 (g/100ml)	土壌空気量 (容積%)	容 積 重 (g/100ml)
1	0-5	9.3	158.4	21.5	139.5	14.0	153.0
	5-10	4.6	167.4	9.6	159.6	6.6	165.7
	10-20	4.0	177.1	6.1	163.2	7.9	165.8
	20-30	4.1	156.8	3.8	157.6	5.9	155.9
2	0-5	12.0	149.5	23.6	142.9	19.3	150.6
	5-10	5.8	164.6	11.3	163.9	8.6	163.8
	10-20	5.9	168.8	10.8	157.5	5.8	176.8
	20-30	4.1	159.4	3.9	160.4	7.0	148.6

注 1) 降水量：6月26日 85mm 6月29日 6mm
 2) 0-20cm層は作土層 20cm以下は心土層

表-2 夏期における土壌空気量

ほ場番号	調査月日	1965・8・18		1965・8・19		1965・8・20	
		土壌空気量 (容積%)	容 積 重 (g/100ml)	土壌空気量 (容積%)	容 積 重 (g/100ml)	土壌空気量 (容積%)	容 積 重 (g/100ml)
3	0-5	26.6	144.2	35.3	132.2	37.2	129.8
	5-10	23.8	146.7	28.0	144.8	28.4	142.0
	10-20	15.4	161.4	22.8	154.1	19.3	157.0
	20-30	7.2	170.2	8.5	167.4	15.7	164.1

注 1) 8月17日に30mmの散水カンガイをおこなった
 2) 0-20cm層に作土層, 20cm以下は心土層

* 東海近畿農業試験場畑作部 ** 現農事試験場畑作部

含むが、大部分は報文^{8,10,11)}としてすでに発表し、または学会⁹⁾で報告してきたものである。

2. 武豊鈹質土壤における土壤空気量

自然の環境下におかれた鈹質畑地で、土壤の空気量が経時的にどのように変化しているかをみるため、直接は場で土壤三相の変化を、梅雨期と盛夏期について調査した。

調査の対象とした東海近畿農業試験場・畑作部（愛知県・武豊町）内の畑土壤は、鴨下のいう赤褐色土壤に属し、洪積層堆積物からなり、腐植含量は1~2%、土性は作土がSCL、下層土はLiCの典型的ないわゆる鈹質土壤である。そのほ場で、梅雨期における土層内の土壤空気量を調査した結果は表-1のとおりであり、作物の根圏域層にあたる深さ5~20cmの空気量は10%以下である場合が多かった。このような梅雨期における土壤空気量の低下は、多くの畑作物に対して悪影響を及ぼすものと考えられ、事実、調査ほ場のソルゴー幼植物は湿害の様相を呈し、生長点に近い葉身は赤紫色味をおび、生育は矮性となっていた。また、心土層に属する重粘ち密な下層土の空気量も10%以下できわめて少なく、しかもこれらは梅雨期だけでなく、盛夏期においてもきわめて少ない傾向を示した（表-2）。この下層土の空気量不足は作物根の伸長をさまたげ、作物に対していわば慢性的な湿害をおこさせるものと考えられる。さらに、このような下層土は作土層における排水を遅らせ、一層作物の湿害を助長させているものと考えられる。夏期における土壤の空気量・水分量の変化は作土層内でも、根群のもっとも多いと思われる0~10cm層の比較的上層部ではげしく、根量の少ない下層部ではその変化が緩慢であった（表-2）。大部分の夏作物は、生育前期がさきへのべた空気含量のいちじるしく低下する梅雨期にあたり、作物根の分布は作土層内のきわめて浅い位置に集中する。したがって、梅雨期にすぐつつく夏期の高温時には、地上部の旺盛な生育につれ蒸散量も増大して、ますます土層の表層部位の水分は減少し、作物は萎凋を起しやすくなるものと思われる。そこで、夏期における萎凋を防止するには、カン水もさることながら、梅雨期に作土層内の排水をはかり、根域を垂直的に拡げることが肝要であると考えられる。

3. 土壤の空気量と作物の生育

従来から、培地の空気組成と作物の生育との関係が、ポット規模の実験で多く論じられている。しかしながら、培地がとくに自然ほ場である場合には、採取した土壤空

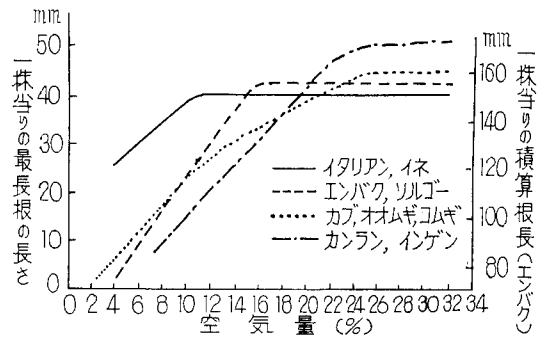


図-1 土壤の空気量と作物根の伸長

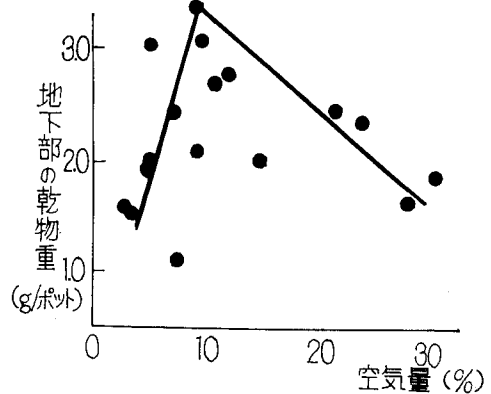


図-2 空気量とタマネギ地下部の生育

気の組成が根群領域のそれと同一であるとはかぎらないため、空気組成を土壤通気性の指標としてとりあげ、植生との関係を論じるには困難さを伴ってくる。そこで、筆者らは土壤水分が植生に対して制限因子とならないかぎり、根圏域をとりまく空気中で満たされた孔隙量の大小、すなわち土壤空気量の大小が植生に關係した土壤通気性の良否を決定するものと考え、とりあえず、土壤空気量と植生との関係について実験をすすめた。

1) 人為的培地による実験

実験には未耕地の表層土で、腐植含量のきわめて少な

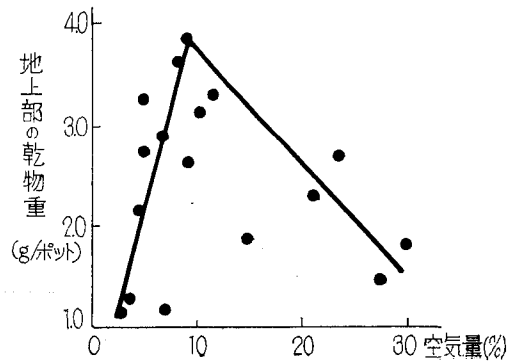


図-3 空気量とタマネギ地上部の生育

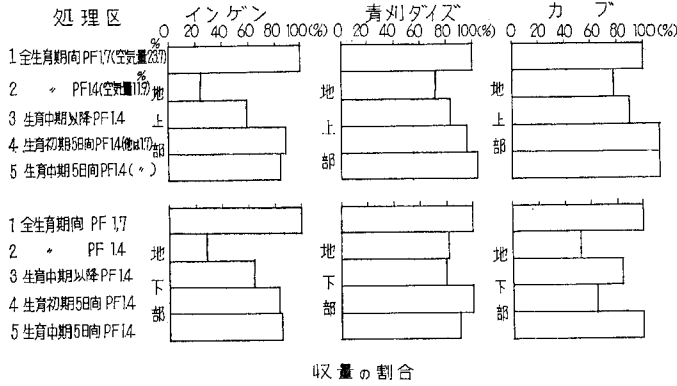


図-4 作物の生育段階と土壌空気の要求度

い、SLの土性を示す鉍質土壌を供試した。この土壌の風乾細土を100ccの金属円筒あるいは1/5000アールのポットに容積重が1.30, 1.35, 1.40, 1.45, 1.50, 1.55, 1.60 g/cm³になるように充填し、これらの容積重土壌に対して、pF 1.0, 1.4, 1.7, 2.0の土壌水分を与えることにより、表-3に示したような各段階の空気量をもった培地を設定した。これらの培地に代表的な青刈飼料作物、そ菜、穀実作物を播種して、発芽の状態、根の伸長度合、地上部の生育、無機養分の吸収状態を調査した。作物根の伸長と土壌空気量との関係をみた結果は図-1および図-2のようであり、作物の種類によって、それぞれの臨界空気量の異なることが認められる。この結果から作物を分類してみると次のようになった。

- ① もっとも空気量を要求するもの (24%) カンラン・インゲン
- ② 比較的空気量を多く要求するもの (25%) カブ・コンモンベッチ・キウリ・オオムギ・コムギ
- ③ 比較的空気量の要求が少ないもの (15%) エンバク・ソルゴー
- ④ もっとも空気量の要求が少ないもの (10%) イタリアンライグラス・イネ・結球前のタマネギ

各作物の発芽状態をみたところ、作物の発芽(双葉あるいは葉鞘の出芽)に及ぼす土壌空気量の影響は作物根の伸長へ及ぼす影響より小さく、ソルゴー、カブ、カンランは土壌空気量が14%以下になると発芽数はいちじるしく減少し、エンバク、コンモンベッチ、キウリ、オオムギ、コムギではほぼ10%以下、イタリアンライグラス、イネでは8%以下になって発芽数が低下していた。

生育初期のタマネギ(移植後約80日まで)はむしろ多水分の培地で生育が良好であり、図-2のように土壌空気量が8%前後の培地でもっとも根量が多く、また図-3のように地上部の生育も良好になっているが、鱗茎肥

大期になると、生育初期の場合とは逆に土壌水分の多いほど生育の劣ることが認められている²⁾。土壌空気の要求度は、作物の種類によって異なるばかりでなく、タマネギの例にもみられるように、同一作物でも生育ステージによって違ってくるものと考えられる。そこで、インゲン(マスターピース)、青刈ダイズ(黒千石)、カブラ(下総)を1/2000アールポットに栽培し、生育時期別(初期・中期・後期)に鉍質土壌培地の水分を適水分のpF 1.7(土壌空気23.7%)から多水分のpF 1.4(土壌空気11.9%)にかえて、土壌空気量を低下させ、

それらの作物の生育段階と土壌空気低下による生育障害の程度について調査した。その結果は図-4のとおりであり、インゲン、カブラでは生育初期から中期にかけて土壌空気が低下すると生育はいちじるしく抑えられ、前者では地上部・地下部の生育、後者では根部の肥大が阻害された。また、青刈ダイズではインゲンにくらべ、土壌空気低下の影響が小さかった。なお、従来からわが国で報告されている湿害発生時期と生育段階に関する試験結果^{14,16)}にはむしろ作物の生育初期は湿害をうけにくく、中ないし後期になってその被害が顕著にあらわれる傾向もみられるが、その被害の現われ方には根圏域層の空気量の程度すなわち過湿の程度によって遅速が

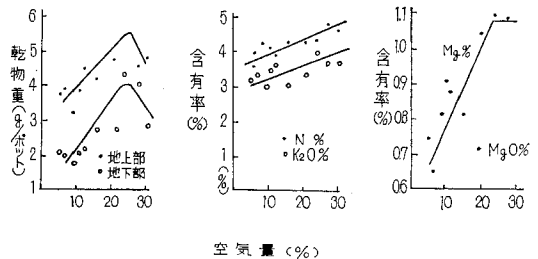


図-5 空気量とインゲンの生育および養分含有量

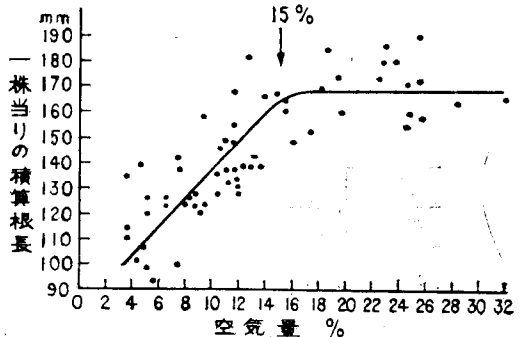


図-6 自然構造をもった培地に生育したエンバクの根の伸長と空気量

表-3 各容積重土壌のPF-水分率とPF-空気率

容積重 g/100cc	PF・水分 空気		PF1.0		PF1.4		PF1.7		PF2.0	
	水分 (V%)	空気 (V%)	水分	空気	水分	空気	水分	空気	水分	空気
130	42.2	8.8	38.8	12.2	24.0	27.0	18.4	32.6		
135	39.6	9.5	37.2	11.9	25.4	23.7	19.0	30.1		
140	38.8	8.4	36.7	10.5	26.3	20.9	19.6	27.6		
145	38.8	6.5	36.4	8.9	28.3	17.0	20.3	25.0		
150	38.5	4.9	36.4	7.0	29.3	14.1	20.7	22.7		
155	37.2	4.3	36.3	5.2	32.4	9.1	25.8	15.7		
160	36.3	3.3	36.2	3.4	33.0	6.6	27.0	12.6		

あるものと思われ、筆者らの実験のように、強度の過湿条件が表層根域にまで均一に与えられた場合には、その被害は生育初期から現われやすくなるものと考えられる。

土壌空気あるいは土壌酸素の減少が作物の養・水分吸収の阻害をもたらし、作物の生育を不良にすることはすでに多くの研究者^{5,12)}

表-4 土壌空気の変化した培地におけるインゲンの蒸発散量 (g/ポット)

処 理 容 積 重 (g/100cc)	測定日		1965.10.21*	1965.10.33**
	pF	空気量 (V%)		
135	2.0	30.1	48	40
	1.7	23.7	50	55
	1.4	11.9	10	40
140	2.0	27.6	50	45
	1.7	20.9	48	55
	1.4	10.5	23	10
145	1.0	6.5	18	20
155	2.0	15.7	33	40
	1.7	9.1	28	30
	1.4	5.2	18	35

注 * 1965.10.20 pm 5.00~ 1965.10.21 am 11.30 の蒸発散量

** 1965.10.29 pm 5.00~ 1965.10.30 am 10.30 の蒸発散量

によって認められている。筆者らの試験においても土壌空気量が低下すると、図-5にみるように、インゲンでは地上部におけるチッ素・カリウム・マグネシウムの含有率が低下し、また表-4のように蒸発散量も低下した。その他、ソルゴー、カンラン、タマネギでも養分吸収に関してほぼ同様な結果をえている。

2) 自然構造をもった培地による実験

これまでは土壌の空気量と作物の生育との関係を風乾細土によって設定した人工培地でみてきたが、ここでは東海近畿農業試験場・畑作部内のは場から採取した自然構造の培地を用いて、土壌空気量と作物根の伸長との関係について検討した。本実験の場合、約90mmの自然降雨があったのち、5日間連続して、作土層の表面から0~5cm、5~10cmの2つの土層にわけ、100cc容の金属円筒に土壌を採取することによって、空気量が4%から30%まで変化した約70点の培地をえた。これらの培地にエンバクの催芽種子をまき、播種後1週間目の根長を測定した結果は図-6のとおりで、土壌空気量とエンバク根の伸長度合との関係は、さきへのべた人為的培地での実験結果と同様な傾向を示し、エンバク根の伸長は土壌空気量が15%以下になると低下していた。人為的培地と、それとは明らかに構造の異なる自然培地とで、土壌空気量と作物根の伸長との関係がほぼ一致したことは、土壌空気孔隙量と土壌通気性との間に密接な関係のあることを示唆させる。

表-5 トウモロコシの生育および収量 (kg/a)

処 理	畦の高さ (cm)	1966.6.27 (幼植期)		1966.7.14 (成長期)		1966.8.2 (収かく期)	
		生体重	草丈 (cm)	生体重	草丈 (cm)	生体重	草丈 (cm)
平畦区	0	12.4	67	96.1	132	448.5	240
低畦区	5	14.6	74	130.3	143	430.0	268
中畦区	10	23.1	79	229.5	158	579.0	287
高畦区	20	18.9	79	220.3	154	548.5	273

表-6 畦の高さと土壌の物理性

処理区	空 気 量 (%)			容 積 重 (g/100cc)			透 水 係 数		
	土層の深さ 0~5cm	5~10cm	10~20cm	0~5cm	5~10cm	10~20cm	0~5cm	5~10cm	10~20cm
平 畦	10	8	4	154	163	167	2.6×10^{-3}	4.4×10^{-3}	3.5×10^{-4}
低 畦	18	10	6	144	158	160	1.1×10^{-2}	2.9×10^{-3}	6.9×10^{-4}
中 畦	33	14	8	128	156	163	1.0×10^{-2}	2.8×10^{-3}	4.6×10^{-4}
高 畦	38	25	13	124	142	155	1.2×10^{-2}	1.0×10^{-2}	2.0×10^{-3}

注 1) 土壌の空気量は多量カン水期間(10日間)中の平均値
2) 容積重および透水係数は多量カン水終了直後の測定値

3) 自然ほ場における土壌空気量の変化と作物の生育

武豊鉦質土壌のは場において、畦の高さを平畦(0cm)、低畦(5cm)、中畦(10cm)、高畦(20cm)の4段階に変化させ、梅雨期の降雨に擬した多量の散水カンガイ(1日30mm)を連続10日間おこなうことによって、土壌空気量の変化した培地を設定し、土壌空気量の変化と青刈トウモロコシの生育との関係を見た。トウモロコシの栽培期間は1966年5月27日から8月2日までの約70日間であり、上記の散水処理はトウモロコシが発芽してから10日目以後の生育初期(6月11日~6月21日)におこなった。

青刈トウモロコシの生育収量は表-5のとおりであり、平畦および位畦区の生育はいちじるしく低下し、収量は高畦区、中畦区にくらべて20%減収した。この平畦、低畦区の減収は青刈トウモロコシの生育初期におこなった多量の散水処理が、これらの区における土壌空気量をいちじるしく減少させたためであり、表-6に示すように、散水期間中の主根圏群域層における土壌空気量は10%以下であった。なお、これらの根圏域層には2価鉄の存在を認めなかった。また、畦の高さを変化させると土壌の物理性はいちじるしく変化し、平畦・低畦区では、中畦・高畦区にくらべて容積重が大きく、大孔隙は少なくなって、透水性は低下した(表-6)。この

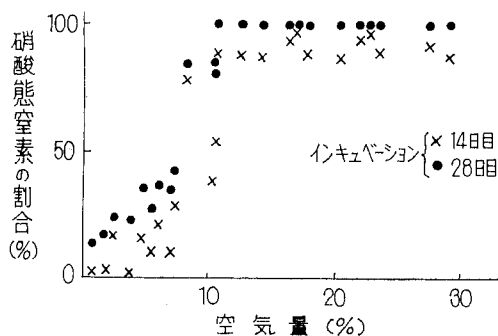


図-7 土壌空気量と硝酸化成

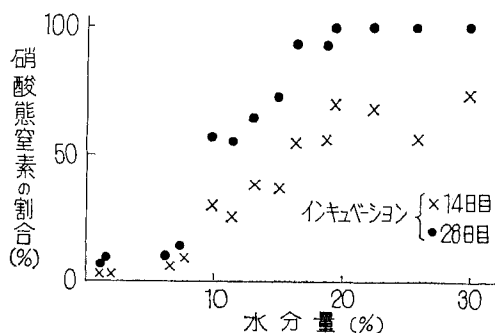


図-8 土壌水分量と硝酸化成

ような平畦区・低畦区でみられた物理性の悪化は、多量散水が一時的にもせよ、これらの区の地表面を水で覆うことになり、そのため大きな団粒が破壊されて、2次粒子の分散がおこり、孔隙が減少したことにあると考えられる。以上の結果からみると、鉦質土壌畑における排水対策として、畦立て栽培をおこなうことは、簡便であり、いちじるしい効果が期待できよう。

4. 土壌の空気および水分が土壌窒素の形態と有機物の分解に及ぼす影響

土壌の通気不良は直接的に根の呼吸障害をもたらし、作物の養・水分吸収をさまたげて生育を不良にすると同時に、土壌中の化学的・微生物活動にも変化を及ぼし、そのことがひいてはまた植生に影響を与えるとも考えられる。

ここでは、過湿・過干におち入りやすい鉦質土壌畑の

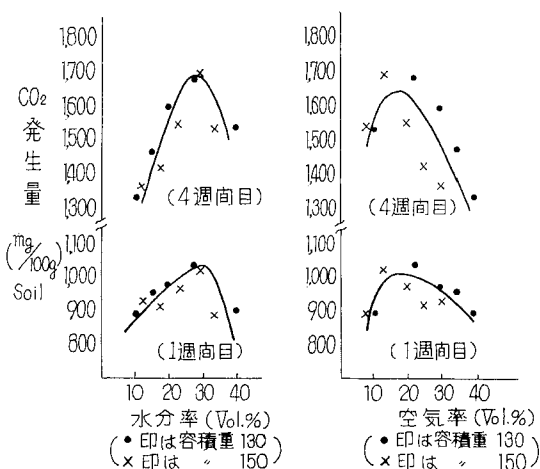


図-9 青刈ダイズの分解におよぼす水分、空気の影響

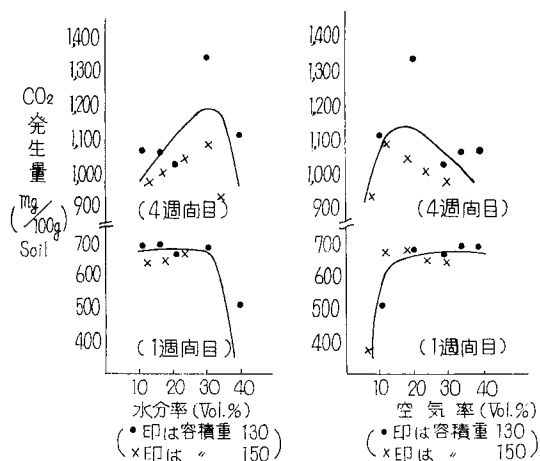


図-10 イネわらの分解におよぼす水分、空気の影響

表 7 添加有機物の分解に伴う2価鉄の生成
(インキュベーション2週間目)

容積重 (cc/100g)	pF	土壌空気量 (容積%)	青刈ダイズ 添加区	イネわら 添加区	無添加区
130	1.0	9.2—10.1	9ppm	tr	—
	1.5	15.2—21.7	—	tr	—
	2.0	28.6—31.4	—	—	—
	2.8	33.7—37.3	—	—	—
	4.0	38.8	—	—	—
150	1.0	6.6— 8.7	423	780	—
	1.5	8.9—12.7	tr	tr	—
	2.0	18.2—19.3	—	—	—
	2.8	23.8—26.7	—	—	—
	4.0	29.6	—	—	—

注 1) 土壌空気量に巾をもたせているのは、有機物添加の種類によって空気量に若干の差が生じたためである
2) 一印は不検出

特質にかんがみて、通気性・土壌水分を重視し、それらが硝酸化成および新鮮有機物の分解に及ぼす影響について実験した結果をのべる。

1) 土壌空気・水分と硝酸化成

この実験に供試した土壌は東海近畿農業試験場・畑作部の腐植に乏しい土性が SCL の表層土で、風乾し2mm目のふるいを通した。この土壌を pH6.8 に矩正し、土壌100g 当り 20mgN の硫酸を加えて 100cc 容の金属円筒に種々の異なった容積重となるように充填した。ついで、これら各種の容積土壌に数段階の水分条件を与えて、空気量と水分量の変化した培地を設定し、30°C で4週間インキュベーションをおこない、経時的に硝酸化成率を測定した。その結果は図-7 および図-8 のとおりであり、インキュベーション期間の長短にかかわらず土壌空気量が10%以下になり、また水分量が15%以下(この場合、土壌空気は充分に存在する。)になると硝化作用はいちじるしく低下した。

一般に畑作物は土壌中に NH₄-N が蓄積すると生育障害を起しやすく、硝酸化成の順調にすむ土壌環境が必要であるとされているが、今後はさらに、通気性—窒素の形態 (NO₃-N, NH₄-N ばかりでなく、N₂, N₂O, NO, NO₂ なども含めて) —作物の生育あるいは窒素経済の関係について、知見を集積する必要がある。

2) 土壌空気・水分と新鮮有機物の分解

供試土壌は東海近畿農業試験場・畑作部内の土性が SCL の鈹質土壌である。この土壌に、2%に相当する青刈ダイズおよびイネわらの乾燥粉末を加え(イネわら添加の場合は土壌100g 当り20mgの窒素を添加した。)、前項でのべた硝酸化成に関する実験の場合と同じように、人為的に土壌の水分率・空気率の変化した培地を設

定し、30°C で4週間のインキュベーションをおこなって、土壌の水分量・空気量と新鮮有機物の分解とくに炭酸ガスの発生、2価鉄出現の関係を検討した。

その結果は図-9・図-10および表-7に示したとおりで、青刈ダイズ、イネわらの両添加区とも水分量が27—30%、空気量が12—22%(pF 1.5に相当)で炭酸ガスの発生量をもっとも多く、それよりも過湿になって空気量が12%以下になったり、また逆に水分量が23%以下に低下して土壌が乾燥すると炭酸ガスの発生量は減少した。有機物の分解には、とくにカビおよび放線菌の増殖と活動が必要であると思われるが、それには土壌の十分な通気性が必要条件であり、さらに通気性が制限因子にならない範囲内では、できるだけ土壌水分の多い培地が炭酸ガスの発生、すなわち有機物の分解に最適の条件であると推察される。

また、2価鉄の生成は新鮮有機物の存在と通気性の良否によって支配されていたが、本実験の結果では、多量の新鮮有機物(2%添加)が添加され、空気量が12—13%以下になってはじめて、2価鉄が生成し、有機物無添加区では、4週間にわたるインキュベーション期間中、土壌空気低下の処理区(土壌空気6.6%、土壌水分36.4%)においても2価鉄は全く検出されなかった。このことからみて、一般畑地でのいわゆる湿害は、有機物が多量に存在しないかぎり、2価鉄など還元物質の存在よりも、土壌空気量(酸素あるいは炭酸ガス濃度)が主要な原因になるものと考えられる。しかし、この点については、さらに詳細な検討が必要である。

5. 鈹質畑地における土壌空気の組成

自然畑場における土壌空気組成の測定には次のような点で困難を伴う。すなわち、1) 目的とする一定容積内(主として根圏域部分)から土壌空気を採取すること、

表-8 武豊畑場における土壌空気の組成(容積%)
(1968年7月3日測定)

土層の深さ	高畦区		低畦区		イネ、わら堆肥投入区	
	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂
5 cm	0.30	欠測	2.26	15.9	2.74	16.0
10	0.24	21.2	1.60	17.1	1.50	20.6
20	0.76	21.1	1.24	20.6	5.96	17.1
30	1.80	20.5	3.66	14.5	8.70	14.6
40	4.86	10.5	5.96	12.8	9.00	15.0

注 1) 高畦区および低畦区の畦の高さはそれぞれ30cmおよび10cmである
2) 堆肥はアール当り300kg施用した
3) ガスの採取は M.T. Yastrebov¹⁶⁾による土壌空気採取杖を簡便に改良した採取管による
4) ガス組成の分析はガスクロマトグラフによる

2) 1) の目的を達成するための空気採取装置を開発すること、3) 採取した土壌カスの組成を正確に定量すること……などである。

以上のような困難さがあるにもかかわらず、すでに諸外国では、古くから自然は場の土壌空気組成が測定され、作付、耕耘法、土壌の深さ、気候あるいは季節などとの関係で、データが集積されている。わが国においても、丹下¹⁴⁾、位田³⁾、矢吹¹⁸⁾、梅林・北岸・高橋¹⁷⁾らの測定例が報告されているが、まだその数は少ないのが実状である。

筆者らも現在、まず鉦質土壌畑における土壌空気組成の実態を知るために、東海近畿農業試験場・畑作部のほ場で、土壌空気の組成を測定中であり、その間、さきへのべたような測定上の困難に種々遭遇しつつあるが、それらの点については機会をあらためて報告することにし、ここでは、現在までに測定した実測例の二を簡単に紹介するとどめておきたい。

表一8は梅雨期に、炭酸ガスと酸素の濃度を高畦区と低畦区で、また低畦区にイネわら堆肥をアール当り300kg投入した区で測定した例である。これらの結果からみると、高畦は土壌通気を良好にし、堆肥の投入は炭酸ガスの濃度を高め、酸素の濃度を低めていた。なお、ち密な下層土の直上にあたる上層深30cmの層あるいは心上部分の層で、酸素濃度のいちじるしく減少することが注目される。

わが国においても土壌空気の組成と植生との関係は、これまでポット規模の実験で多く紹介されているが、今後は自然ほ場でのガス組成の実態を把握し、それらと植生との関係を考察するとともに、種々の構造条件に伴なう土壌空気の交換過程あるいはガス交換過程についても究明する必要がある。

6. おわりに

土壌の通気性と植生の問題に関連して、根圏領域への酸素の拡散速度 (Oxygen diffusion rate) と植生との関係が論じられるようになり、Lemon, Erickson^{6,7)}によって白金電極を使った酸素拡散メーターが紹介されて、その方法により測定された酸素の拡散速度と植生との関係が最近多く論じられている¹³⁾。それらの結果の多くは、酸素拡散速度と発芽・根の伸長・地上部の生育との間に直線的な関係があるとしており、筆者らのとりあげた土壌空気量と植生との関係も、さらに酸素拡散速度と関連させて検討する必要がある。なお土壌通気性の測定は、ガスクロマトグラフの進歩や種々のポーラログ

ラフ電極を使った酸素拡散メーターの開発によって、容易になりつつあり、今後、土壌物理の分野でも、とくにわが国で立ち遅れている土壌通気性と植生・土壌の化学性・土壌の微生物活動などとの関係が、詳細に解明されていくものと期待される。

文 献

- 1) 堀田良 生態生理的に見た畑作物湿害の機作および診断ならびに対策に関する研究 新潟農試研報 第17号, 1—45 (1947)
- 2) 東駿次・川出武夫・小島昌弘・木下隆雄 主要そさいの土壌水分に対する生態反応について 東海近畿農試研究速報 第4号, 23—34 (1967)
- 3) 佐田藤久太郎 蔬菜園の土壌空気組成 農及園, 27, 989—991 (1952)
- 4) 池田利良・東駿次・川出武夫 麦の生育時期における土壌過湿の影響 東海近畿農試研報 栽培部第4号, 30—37 (1957)
- 5) Lawton, T. The influence of soil aeration on the growth and absorption of nutrient by corn plant soil Sci. Soc. Amer. Proc., 10: 261—268 (1945)
- 6) Lemon, E. R. and Erickson, A. E. The measurement of oxygen diffusion in the Soil with platinum micro-electrode Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 16: 160—163 (1952)
- 7) Lemon, E. R. and Erickson, E. R. Principle of the platinum microelectrode as a method of characterizing soil aeration, Soil. Sci. 79: 382—392 (1955)
- 8) 三木和夫・森哲郎 新鮮有機物の分解に及ぼす土壌水分、空気の影響 東海近畿農試研報, 第17号, 59—66 (1968)
- 9) 森哲郎・井田明 鉦質畑土壌における窒素の行動に関する研究 (第1報) 硝酸化成に及ぼす2, 3の理化学性について 日土肥講演要旨集, 第14集, 122 (1968)
- 10) 森哲郎・小川和夫 土壌の物理的要因と作物の生育に関する研究 第1報 土壌の空気量・硬度と作物の生育 東海近畿農試研報 第16号, 77—104, (1967)
- 11) 小川和夫 鉦質畑土壌における地力要因の解析的研究 東海近畿農試研報 第18号 印刷中
- 12) Russell, M. B. Soil aeration and plant growth in soil physical condition and plant growth By Byron, T. Schaw ed. Academic press 254—291 (1952)
- 13) Stolzy, L. H. and Letey, J. Characterizing soil oxygen conditions with a platinum microelectrode Advances in Agronomy, 16 (1964)
- 14) 丹下恭次 耕土の土壌呼吸に就て 農及園 19: 501—502 (1944)
- 15) 東京大学農学部土地改良研究室 研究の資料と記録 第3集 22—24 (1956)
- 16) 時政文雄 麦類の湿害に関する研究 (第3報) 過湿地における根部の生育に関する一・二の観察 日作紀 21: 258—259 (1952)
- 17) 梅村正直・北岸確三・高橋利郎 土壌中より発生する各種ガスのガスクロマトグラフィーによる分離定量 (第2報) ハウス土壌空気およびハウス内空気のCO₂の定量, 日土肥学会42年秋季臨時大会講演要旨集 59 (1967)
- 18) 矢吹万寿 高畦内土壌空気の炭酸ガス濃度 農業気象 21: 113—114 (1965)

陽荷電合成高分子の作用について

横 井 肇*

1. まえがき

最近陽荷電の合成高分子の土壌改良剤としての機能が注目され、二、三の製品はすでに市販されて実際に使用されている。これらの合成高分子を土壌の懸濁液に添加すると、土壌粒子の急激なぎょう集沈降を起させる作用が明らかで、土壌の構造に大きな影響を与えうると考えられる。この種の合成高分子の一である EBa については、すでに富士岡らの報告¹⁾があり、きわめて興味深い作用を有することが認められている。一方従来わが国でかなり詳細に検討された土壌改良剤として、ポリビニールアルコール（以下PVAと略記する）があるが、これは湿じゅん状態で添加しても、土壌のコロイド状態に肉眼的な変化を起さず、その団粒生成の作用は、一旦乾燥させることが必要とされている。筆者はこれら両者の作用を比較することによって、新しい陽荷電合成高分子の作用を明らかにしようと考え、二、三の物理性を測定した結果、両者の作用に明らかな差異が認められたので報告する。

2. 供試試料および実験方法

1) 供試土壌

i 兵庫神出土壤(Hy)：水田土壤，土性 LiC，粘土鉱物 1:1 型

ii 東京荒川土壤(To)：荒川沖積土壤，土性 LiC，粘土鉱物 1:1 型

iii 佐賀有明土壤(Sa)：有明干拓土壤，土性 HC，粘土鉱物 2:1 型

iv 栃木宇都宮土壤(Ut)：水田土壤，土性 CL，粘土鉱物アロフェン

2) 供試合成高分子

i EBa：日本 EB 株式会社製品

ii DH-2：日東紡績株式会社試供品**

3) 実験方法

* 農業技術研究所化学部

** 数種の同系統の高分子が開発されており、種類によって若干の差があるがDH-2はその中の一種である。

i 沈定容積：常法によったが、合成高分子添加以外の処理を併用した場合には、無添加処理区を100として、比率のみ表示した。

ii ぎょう集力：金属刃による土塊の切断抵抗 (Soil Cohesion) を測定した²⁾。

iii 飽和せん断抵抗：一面せん断装置を用い、土壌下面にポーラスプレートを当て、荷重1~5 kg/cm²で平衡に達した状態で測定した。

iv 団粒分析：水中篩別法により、耐水性団粒を測定した。

3. 測定結果と考察

1) 水中沈定容積

i 添加量と土壌の種類
はじめに述べたように供試合成高分子は、土壌のコロイド状態に顕著な変化（主としてフロックの形成）をひき起すので、土壌の水中沈定容積を測定することにより添加の効果を簡単に判定できると考え、4種類の土壌を供試して、乾土に対し

0.001~2.0% を添加して水

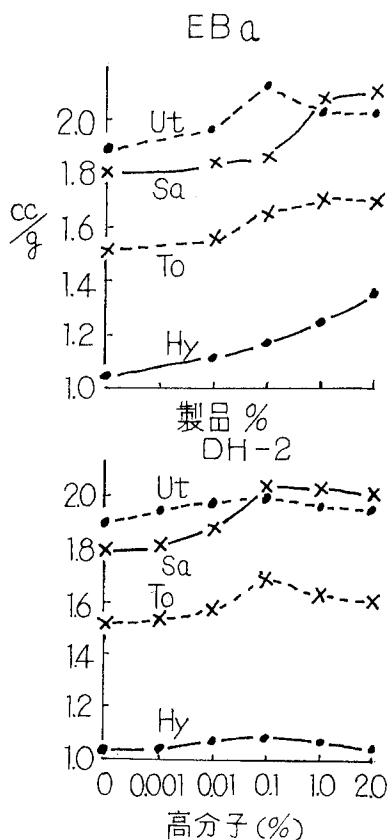


図-1 添加量と沈定容積

中沈定容積を測定した。測定結果は図一1に示したが、両者とも明らかな沈定容積増大の効果が認められた。EBa の場合には宇都宮土壌を除き、2.0%までは添加量の増加に従って沈定容積も増大し、またいずれの場合にも再分散の現象はみられなかったが、DH-2 の場合には、0.1%で最大値を示し、1.0%以上添加すると、沈定容積は逆に減少し、同時に陽荷電によると思われる再分散の現象が認められた。これらの結果から火山灰土壌を除いて、一般の鈹質土壌の場合には、最も効果の高い添加量として、EBa 1%、DH-2 0.1%添加を以下の実験に用いることとした。

つぎに沈定容積をPVA添加と比較した結果を図一2に示した。これによると、PVAの添加は、湿じゅん状態ではほとんど沈定容積の変化を起させないが、一旦風乾させた場合にはかなり沈定容積が増大する。これは後述の団粒生成作用の結果と考えられ、沈定容積を大きくする機構は、他の二者と全く異ったものと推定される。

ii 添加前の土壌条件 前記のように、陽荷電合成高分子は土壌の懸濁液に顕著に作用するが、これは陰荷電の土壌粒子に対する荷電の中和作用とみなされるので、土壌粒子の存在条件などと密接に関連すると想像される。このような問題は実際には場で使用する場合には重要なことで、また合成高分子の作用機構を追求する上でも必要なことであるので、PVAとの比較とは別に検討した。図一3に示したように、風乾土に直接稀薄溶液を添加した場合より、加水後添加、還元後添加、アルカリ処理後添加の各処理区は、大なり小なり沈定容積の増大が著るしかった。とくに還元あるいはアルカリ処理の場合その傾向が大であった。恐らく両処理は土壌粒子の陰荷電

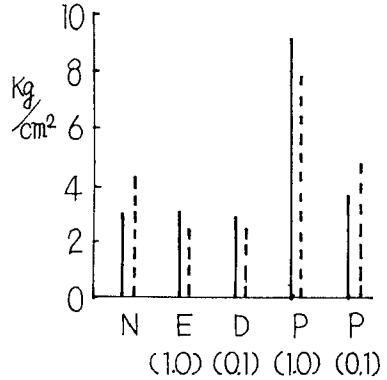
を大きくして分散性を強くした結果と考えられる。

2) ぎょう集力と飽和せん断抵抗

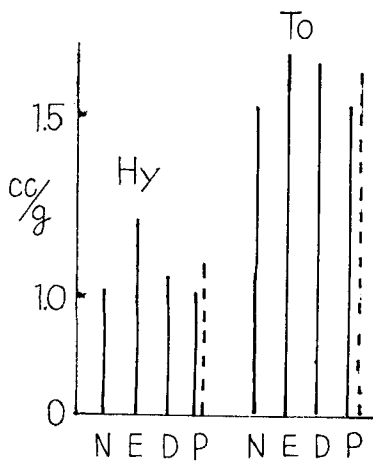
ぎょう集力は土壌粒子間の毛管力および固

結物質による結合力が測定できるので、金属刃による切断抵抗の測定を行なった。簡単のため風乾土の測定結果のみ図一4に示した。陽荷電合成高分子であるEBa区とDH-2区は両者ともとくに無処理区と差異を示さないか、より小さく、高分子が固結剤として作用していないと考えられた。これに反して、PVA区は添加量に応じて明らかにぎょう集力の強まりが認められ、乾燥に伴って高分子が土壌粒子間を固結させる役割を果たしていると推定された。従ってPVAと他の二者との間には土壌粒子に対する結合様式に根本的な差異があるのであろう。

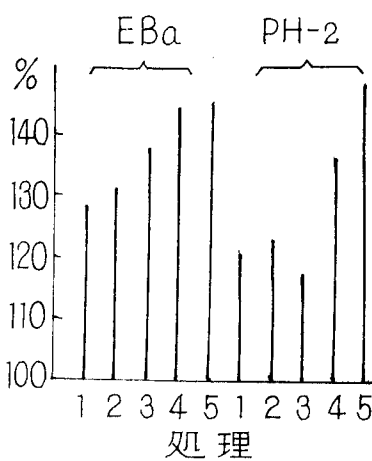
つぎにぎょう集力と密接に関連するせん断抵抗について、飽和条件下のそれを測定した。筆者の従来の成績⁹⁾によれば、極端に粗粒質でない土壌の場合、節別粗土の飽和せん断抵抗は、土壌の種類と無関係にほぼ一定となるので、節別しない土壌について同様に測定すれば、固



図一4 風乾土のぎょう集力 (—兵庫土壌, ……荒川土壌)



図一2 沈定容積によるPVAとの比較 (……一旦風乾節別) N:無処理 E:EBa (1%) D:DH-2 (0.1%) P:PVA (0.1%)



図一3 添加前の土壌条件(兵庫土壌) 1. 風乾土に直接添加 2. 加水後添加 3. 添加後還元 4. 還元後添加 5. アルカリ処理後添加

結剤によるぎょう集力は荷重に相当する力として作用し、粘着力 (shear cohesion) を示すと考えられる⁹⁾。図一5に測定結果を示したが、土壌は湿じゅん状態で処理し、トリミングリングに充てん後室温で放置し、一旦風乾後、再び毛管上昇により十分に水分飽和とし、測定したものである。この結果によると、PVA区の風乾した場合は明らかに粘着力を示し、他の処理区より大きなせん断抵抗を示したが、他の無添加、EBa、DH-2の各区はいずれも誤差範囲内で一定で、また飽和せん断抵抗の一般例と同じく、せん断直線は

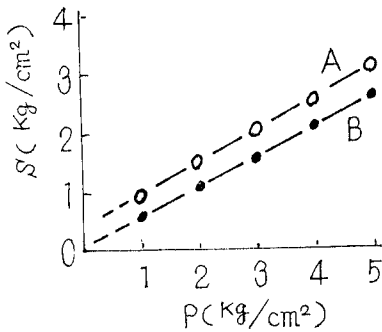


図-5 セン断抵抗(水分飽和)
A: P区の一旦風乾した場合
B: A以外の処理

原点近くを通り粘着力はほとんど示さなかった。このような結果はぎょう集力の結果とよく一致したもので、陽荷電合成高分子には風乾状態と

状態で作用し、コロイド状の土壤粒子をフロク化させるが、これに反し、PVAは湿じゅん状態では土壤のコロイド状態をとくに大きくは変化させず、一旦乾燥させることにより、粒子間の固結剤としての作用が発揮される。しかもその結合作用は再び湿じゅんにもどしても、最初の状態には返らない。従って両者の土壤に対する作用は質的に相違すると断言できる。

土壤粒子と有機合成高分子との作用は、多くの因子によって左右され、簡単に断定することは難しいが、本報告の供試試料に関する限りEBaとDH-2については、荷電的結合力が主として働いたものであり、PVAの場合には、より原子間結合(水素結合あるいは共有結合)に近い作用と想像される。このような点の追求はなお誠に不十分であり、また本報告ではそれを直接意図したものではないが、上記のように結合機構に差異のある場合、きわめて簡単な物理性の測定で、明らかな差異として認められることは注目すべきことと考えられる。このような点については川口らの研究⁹⁾においても認められており、今後高分子の物理性および化学性との関連において詳細に追求すべきことであろう。上記の測定結果にも若干認められるが、合成高分子の種類により、土壤に対する作用は微妙に相違するはずであり、基礎的な検討を必要とする段階にあると考えられる。

なお、PVAとの正確な比較に測定上かなり難点があるので、本報告では省略したが、EBaには①とくに圧密しない限り、透水係数を大きくする⁹⁾。②そ性を大きく変化させる。③付着性を軽減する⁹⁾。など興味深い作用があり、実際は場での使用問題を含めて、今後さらに研究を進める予定である。

本研究に当り、各種測定に協力して下さった本村悟、秋山豊技官、および有機無機複合体の結合について有益な助言を頂いた井ノ子昭夫、玉井理技官に深甚な謝意を表する。

くに固結剤としての作用はないと推定される。

3) 団粒組成

よく知られているようにPVAの作用は団粒の形成にあり、一方供試陽荷電合成高分子は水中懸濁粒子をフロク化させ、両者の作用は類似した面を有すると同時に、作用結果は相当異なると思像されたので、湿じゅんのままと一旦風乾したものにつき、耐水性団粒を測定した。測定結果は表-1に示したが、EBa、DH-2両者とも湿じゅん状態のままでも、無処理に比較してかなり団粒の増加が認められた。しかし両者の場合一旦風乾しても団粒粒径の大きいものが増加するに過ぎず、全量は僅かの増加に留まった。これに反してPVAの場合には、湿じゅん状態のままではほとんど団粒の形成がみられないで、これを一旦風乾した場合には、極端な団粒の増加が認められ、1)、2)の項でもみられた一旦風乾することが、粒子間の固結状態を強めていることが裏がきされた。

4. 総 括

以上の測定結果を総合してみると、個々の考察でもふれたように、EBaとDH-2は両者とも土壤の湿じゅん

表-1 団 粒 組 成 (兵庫土壤)

乾 湿	処 理	団 粒 (mm)					Total %
		>2 %	~1 %	~0.5 %	~0.25 %	~0.01 %	
湿じゅん	N	0	0	1.2	6.4	11.7	19.3
	E 1%	0	0.5	7.7	21.8	31.6	61.6
	DO.1%	0	0.4	6.5	18.4	32.1	57.4
	P 1%	0	0.5	1.0	10.9	13.7	26.1
	P0.1%	0	0.2	1.1	8.8	14.1	24.2
一旦風乾	N	0	0.4	1.9	15.9	16.5	34.7
	E 1%	32.1	13.9	9.4	11.3	6.1	72.8
	DO.1%	20.5	18.5	10.7	12.5	8.8	71.0
	P 1%	90.5	3.2	1.8	1.6	0.8	97.9
	P0.1%	61.4	8.2	4.1	3.5	4.5	81.7

参照文献

- 1) 富士岡義一、荻野芳彦：農土論集、第19号、1 (1967)
- 2) 山中金次郎：農研報告 B6、1 (1955)
- 3) 横井肇、福桜盛一：土肥要旨集、No. 13、6 (1967)
- 4) 横井肇：Soil. and plant Nutr、14、89 (1968)
- 5) 川口桂三郎、古川久雄：土肥要旨集 No. 14、7、臨時大会2 (1968)
- 6) 農技研化学部土壤二科42年度成績書 p. 49 (1968)

土壌水運動理論の諸系列 (3)

—その内容と評価—

III Darcy に始まる飽和流の研究 (その II)

浸透理論体系化研究グループ

7. 土壌水運動方程式の誘導*

執筆担当 東大農 中村良太

1) はじめに

飽和流について成立つ Darcy の法則は理論式ではなく、あくまである条件 (例えば低流速) のもとでのみ成立する実験則であった。それで Darcy の法則の発見以来、より一般の場合 (例えば高速流の場合などを含む) に成立つ浸透流の運動方程式を求めようとする目的、あるいは粘性流体について一般的に成立する運動方程式である N. S 式から Darcy の法則を理論的に誘導しようとする目的での研究が行なわれるようになった。

前報で取扱った研究もこれらの目的にそったものであるが、我々はこちらで、例えば Slichter などのような球群モデルや毛細管モデルといったような具象的なモデルを使ったりあるいは実験によることなしに、数理的方法のみによってこれらの目的を達成しようとする一連の研究を分類することが出来る。

このような研究についてここで扱うが、これについて論じる際に最も重要な概念としてマイクロの場とマクロの場の概念がある。

飽和した土壌中の水の流れを考えるに当って、流れを顕微鏡的に細かく一つ一つの間ゲキの中まで見れば、そこには土壌粒子によって各所で急激に変化させられた間ゲキ内での極めて複雑な流れがある。

しかし一歩はなれて我々の目でダムので体内の浸透流の流線を見たり、またその透水係数を測定しようとしたりすると、そこでは極めて単純な法則 (例えば Darcy の法則) で表わされる単純で滑らかな流れがある。

前のように顕微鏡的な立場で見たときの流れをマイクロの場での流れと呼び、後のように一歩はなれた立場で見たときの流れをマクロな場での流れと呼ぶのである。

これから見れば、粘性流体について一般の場合に成立する運動方程式である N. S 式はマイクロの場での一つ一つの間ゲキの中の流体部分について成立していると考えられるのに反し、Darcy の法則始め、我々が浸透流の方程式として考えるものはマクロの場での式である。

従って一般的に成立つマイクロの場での方程式から、マクロの場での方程式を導き出すことが出来れば、上記の目的は達成出来るというのがこれら研究に共通した基本的な考え方である。

しかし、マイクロの場の間ゲキで成立する N. S 式を普通に流体部分のみについて積分してマクロの運動方程式を導く方法は、境界の形が余りにも複雑であるために不可能である。その上、マイクロからマクロに移り変わるその過程において流体、土の粒子、空気の混在によって各所で物理量があったりなかったりという場の中での微分を考えなければならない所にも大きな困難が存在する。

これらの困難を克服するためにここで扱う各研究においてもいろいろの方法がとられているが、その主なものは次のようである。その第一は、マクロでの浸透水の動きと同じ動きをする仮想的な連続流体を考えてこれについて方程式を立てる方法、第二は Darcy の法則はマクロでの粘性抵抗についての法則であると解釈し、これにマクロでの慣性項を付加して一般の運動方程式を作る方法、第三はマイクロの N. S 式をもととして次元解析的にマクロの方程式を求める方法、第四は一樣流中の球の抵抗についての Stokes や Oseen の近似解からの類推によってマクロの抵抗を求め、方程式を作る方法、などである。

これを研究の歴史と比較してみると、恐らくこの種の研究の最初はバプロフスキーの研究¹⁾であろう。バプロフスキーは1900年代の初期に第一の仮想流体を用いる方法を用いた。日本でも後年中村⁶⁾がバプロフスキーとは全く独立に同じような方法での研究を行なっている。日本での始めてのこの種の研究は1930年に本間²⁾が第二の

* この原稿は、田淵俊雄(東大農)、中野政詩(東大農)、矢橋農吉(教大農)、八幡敏雄(東大農)の討論の結果を中村がとりまとめたものである。

方法によって行なった。そしてこれは N. S 式を平均するという立場をとる高木⁴⁾にも受継がれている。その後村本⁵⁾は中村の方法と高木の方法の両方の影響のもとにやはり N. S 式を平均する立場から、マクロの場が、ミクロの場から独立した物理系をなすことを主張した。この間に第三の次元解析的方法をとるものとして Hubert⁶⁾, Irmay⁷⁾の研究、第四の Stokes, Oseen 近似を用いる方法に沢田⁸⁾の研究があった。最後に吉田⁹⁾は N. S 式でなく、直接に運動量の保存則から出発して Oseen の近似を考え併せる方法を用いたが、これは岡本¹⁰⁾が受継いで高速流及び不飽和流に発展させている。

以下、これらの研究の中のいくつかについて述べることにするが、その際、Darcy の法則に対する立場が二通りあることに注意する必要がある。

その第一の立場は、Darcy の法則は流体に与えられる抵抗力に関する法則である。即ち、単なる抵抗則であって運動方程式にまではなっていないとするものである。

第二の立場は、Darcy の法則は、抵抗力のみではなく、他の慣性力についての関係も含んでいるものであり、従ってこれはもう運動方程式にまでなっているのだとするものである。

研究によっては、このどちらの立場をとっているのか必ずしも明確でないものもあるが、第一の立場をとるものは、この抵抗力の項に慣性項を考え合せて一般的な運動方程式を導き出そうとする姿勢をとるし、第二の立場の研究は、この Darcy の法則をミクロでの N. S 式から導き出して来るその筋道を理論的に明らかにしようとする点に目的がおかれる傾向がある。

以下、特に説明のあるもの以外は記号を共通に

u : ミクロでの実流速、ベクトルで考えるときには u と記し、その x, y, z , 成分を各々 u, v, w , と記す。

U : マクロでの流量流速、ベクトルで考えるときには U と記し、その x, y, z , 成分を各々 U, V, W とする。

λ : 間ゲキ率

d : 粒径

p : ミクロでの圧力、 P : マクロでの圧力、

K : 単位体積の流体に働く外力

$$h = z + \frac{p}{\gamma} \quad ; \quad E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g}$$

n : 土壌粒子表面の法線ベクトル

s : 土壌粒子表面の面積

ρ : 流体の密度

とする。

2) パプロフスキーの研究¹⁾

この種の研究でここで取上げるものうち、一番古いのはおそらくパプロフスキーの研究と思われる。現在我々が入手している文献¹⁾は、1962年に出版された選集であるが、それによるとおそらく1962年代初期と推定される。

パプロフスキーは、マクロな場での流れは、次のような性質を有する仮想的な流体（これを特殊流体と呼ぶ）の流れと考えられるとした。その性質とは、1. 連続体である。2. 重力の影響を受ける。3. $F_m = -\frac{gu}{k}$ で表わされる制動力を受ける。4. 粒子の骨格の影響は考えない。5. せん断応力は働かない。6. 速度は流量流速で考え、圧力は間ゲキ中の圧力そのものとする。7. 密度、圧縮性も間ゲキ中の流体のものと同じである。

ここでは、pore とか粒子とかはもう考えなくなっているが、それは場の変換に相当する、また、3. については、抵抗力は流速の一乗に比例していることであり、その根拠は Darcy の法則である。

そして、この流体の中に無限小の閉曲面を考えて、そこにグランベールの法則を適用し、

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{gu}{k} \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{gv}{k} \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{gw}{k} \end{aligned} \right.$$

$$\text{但し } \theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

というマクロの運動方程式を導いた。

しかし、最初の特種流体を考える経過は直感的なものであり、ミクロの場で成立する N. S 式を平均したり積分したりした結果のものではないし、抵抗力の項については実験法則である Darcy の法則をそのまま用いたのみであり、その内容にまで立入った考察は行なわれな。しかし、抵抗則として Darcy の法則を用いた点、場の変換を用いた点など、後の諸研究で扱われたことが既に含まれていた点は重要である。

3) 本間の研究

1930年の論文²⁾で、本間は次の如く考えた。

鉛直上向きの Z 軸を持つ直交座標系を考え、各軸方向の地下水流の速度成分を u, v, w , とすれば、地下水流については流速が小さく、N. S 式において慣性項の中の $u \frac{\partial u}{\partial x}$, $v \frac{\partial v}{\partial y}$, $w \frac{\partial w}{\partial z}$, 等の項が無視できるので、

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u, & \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v, \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} &= -\rho g - \frac{\partial w}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

となる。

これらの式の右辺の最後の項は粘性による抵抗を表わすものである。定常の場合には(1)式がDarcyの法則と一致することから、この項は次のように書ける。

$$\mu \nabla^2 u = -\frac{\rho g}{k} u, \quad \mu \nabla^2 v = -\frac{\rho g}{k} v, \quad \mu \nabla^2 w = -\frac{\rho g}{k} w$$

これらが近似的に非定常にも成立するとして(1)に代入すると、

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\rho g}{k} u, & \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\rho g}{k} v, \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} &= -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\rho g}{k} w, \end{aligned}$$

となるがこれが地下水の基本運動方程式である。

以上が本間の考え方の要旨である。

本間の研究では、粘性項を見つけるのにDarcyの法則を応用して一般的な運動方程式を導びこうとする立場は明確であるし、N.S式の粘性抵抗項をDarcyの法則によって置き換えている点も簡単である。がマイクロとマクロの場の違いについて、流速その他いろいろの点についてもこの段階ではまだ明らかに分離して考えられてはいない。

本間の研究は日本で最初のこの種の研究である点に意義があり、その後の高木、中村等の研究に影響を与えた。

4) 高木の研究⁴⁾

高木はDarcyの法則の単なる三次元への拡張という従来の地下水の運動方程式に非定常の場合を含ませることを目的として、N.S式をマクロに見た流線に直交する平面内で平均することにより、運動方程式を導びこうとした。

平面は、ある程度以上大きく取れば、その中に十分に多数の粒子が含まれるので、どう取ってもその中の物理量の平均値はある一定の値をとるが、あまり小さく取ると、その取り方によって平均値がバラツクようになる。このようなことから、均一度を定める最小の面積として \bar{f} を定義し、その中でN.S式を平均した。これはマイクロとマクロの境界となるスケールについての概念を提案したこととして、意義がある。

まず、高木はN.S式を

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \cdot \mathbf{u} = X - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} + \frac{\nu}{3} \text{grad div } \mathbf{u}$$

とおき、左辺第二項は二次の微小量であるから省略す

る。粘性項はガウスの定理その他を用いて変形し、

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = \mathbf{K} - \text{grad } \frac{P}{\rho} + \frac{\nu}{\lambda} \Delta U - \nu \int \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}} ds$$

をマクロな運動方程式として導いた。

高木は、N.S式を平面で平均した所がuniqueである。計算については粗い面があるとしても、粘性項として、 $\int \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}} ds$ を出したことは、間ゲキ内での速度分布を考えるようになったこととして観念的には肯定出来る。しかしこれはマイクロな場での量であり、そこを彼は単に $\frac{c}{k} U$ とおくことによってマクロに変換しているが、これはDarcyの法則を抵抗項として使用していることで、これは結果としては本間と同じである。

5) 中村の研究⁶⁾

中村は本間及びOseen近似を用いた沢田の考え方を批判して、パブロフスキーとは類似しているが全く独立に、次の如く考えた。

即ち、マクロでの流れは、ある特殊な性質を持った仮空の連続流体の流れと考えられるとして、まず直感的にマクロの流れの方程式を予想し、これに従って流れる流体を仮定しこれをM流体(Macroscopic Imaginary Fluid)と呼んだ。

このM流体には、方向はマクロな流れと逆向きの方向を持ち大きさは流速Uの関数である抵抗力 $\phi\left(\frac{U}{\lambda}\right)$ が働くが、それ以外の点では一般の粘性流体と全く同じ性質があるものとする。

ここで、M流体の密度を ρ_m 、流速を V_m とすると

$$\rho_m = \lambda \rho \quad V_m = \frac{1}{\lambda} U$$

である。

そしてこのM流体中に体積Vの閉曲面Sを考え、外力をKとしてダランベールの法則より

$$\int_V \left(K - \frac{DV_m}{Dt} \right) \rho_m dV - \int_V \phi dV + \int_S p_m n dS = 0$$

とおきこれから、マクロの運動方程式として

$$\frac{1}{\lambda} \frac{DU}{Dt} = -\text{grad } h - \frac{\mu}{k' \rho} U$$

を導いた。この過程の中では、見掛けの粘性抵抗を省略した点、及び抵抗力としては $\phi\left(\frac{U}{\lambda}\right)$ を $a\frac{U}{\lambda} + b\left(\frac{U}{\lambda}\right)^2 + c\left(\frac{U}{\lambda}\right)^3 + \dots$ と級数展開した第一項までを取った場合として $a\frac{U}{\lambda}$ の形においた点が注目される。

中村はこのM流体を媒介としてマイクロからマクロへの変換系を求めたことになるが、しかしこの変換の求め方はやや観念的で、慣性項の内容などについても細かな説明はない。中村の研究はマイクロの場とマクロの場は性質が違うことをよりはっきりとさせた点に特色があり、こ

の点は村本に引継がれて更に整理される。

中村の研究をバブロフスキーのものと比較すると、類似の点が多いが、見掛けの粘性項を省略した点と、バブロフスキーが抵抗則として Darcy の法則をそのまま用いたのに対して、 $\phi\left(\frac{U}{\lambda}\right)$ を $\frac{U}{\lambda}$ のべき級数で展開しその二乗の項以下を省略した場合として流速の一乗に比例する抵抗力の項を用いた点が大きく異っている。

6) Irmay の研究⁷⁾

Irmay は次のような三次元領域で、N. S 式を平均することを試みた。

その領域とは、均質さが保証されるように十分に多数の上壌粒子を含み、しかもその中ではマクロな諸量の変化は無視し得る程に小さいよう、十分に小さな領域である。

そして、マクロの流れの方向を x 軸に取るとき、この領域の中での平均を考えると、

$\bar{v}, \bar{w}, \bar{uv}, \bar{uw}, \bar{uv}_y, \bar{uw}_z, \bar{u}_{xx}, \overline{(u^2)}_x$, が全くゼロになるとして、N. S 式を変形し、

$$gE_x = \frac{1}{2}(\bar{v}^2 + \bar{w}^2)_{xx} + \nu(\bar{u}_{yy} + \bar{u}_{zz}) - \bar{u}_t \dots \dots \dots (1)$$

とした。(上引いた横線は上述の領域内での平均を表わし、添字はそれによる偏微分を表わす。)

次に L が、二粒子間の間隙の平均距離であるとすると

$$\bar{u}_{yy} + \bar{u}_{zz} = -\beta \frac{\bar{u}}{L^2} \dots \dots \dots (2)$$

とおくことが出来る。

これに $\lambda = \frac{L}{L+d}$ 及び $U = \lambda \bar{u}$

を代入すると

$$\bar{u}_{yy} + \bar{u}_{zz} = -\beta \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3} \frac{1}{d^2} U$$

と表わされる。

また、高速になると流れの拡大部で separation が起るので、結局 $\overline{(v^2 + w^2)}_x < 0$ となると考えた。

そして、上と同様にして

$$\overline{(v^2 + w^2)}_x = -\alpha \frac{(1-\lambda)}{\lambda^3} \frac{U^2}{d}$$

とおいた。

そして、以上を (1) に代入して、マクロの運動方程式を J を動水コウ配として

$$J = \rho \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3} \frac{\nu}{gd^2} U + \alpha \frac{1-\lambda}{\lambda^3} \frac{1}{gd} U^2 + \frac{1}{\lambda g} \frac{\partial U}{\partial t}$$

と求めた。

Irmay の研究は、この項で扱っている諸研究の中では透水係数の内容については最も細かに求められている点に特徴がある。しかし、粒子間平均距離 L を考えて (2) の式のようにおいてしまったことは、次元解析的

あって結局、真直な、同じ太さの毛細管を考えたことと同じであり、結果も Kozeny の結果と類似している。

7) 吉田の研究⁹⁾

吉田は出来上った N. S 式の平均化という立場でなく N. S 式を導き出す基本となった運動量保存の方程式にまでさかのぼって、そこからマクロへの変換を行なった。

即ち、porous media の中で、マクロに対して適当に微小な体積 V の部分について、運動量の實質単位時間増加率は、その流体に働く合力 (体積力と流体境界面に働く応力) に等しいとして

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} \rho \mathbf{u} dV = \int_{V_t} K dV + \int_S \mathbf{n} \cdot T ds$$

但し、 T は応力テンソル

と運動方程式を立てた。

そしてこれから、粒子の存在する所だけ穴のあいていような、そんな形の空間領域についてもガウスの定理が用いられる点を利用して変換を行ない、

慣性項を $\int_{(V)} \rho \lambda \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} \right\} dV$

外力項を $\int_{(V)} \mathbf{K} \lambda dV$

応力項を $\int_{(S)} (\mu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}} - \mathbf{n} p_a) ds$

但し p_a は動圧、 $\bar{\mathbf{u}}$ は $\bar{\mathbf{u}} = \frac{U}{\lambda}$ とおかれたマクロの量と導いた。ここで応力項のみはマクロの量でなくまだミクロの量で表わされていることに注意が必要である。

吉田の研究は、出来上った N. S 式に固執しなかった点と更に穴あき領域での積分をガウスの定理で解決した点によって、特に慣性項の誘導に大きな進歩が見られ、応力項についても圧力項の分離という面で進歩が見られた。しかし、上述のようにこの応力項のマクロの量への変換は完成されず単に Oseen 近似解からの類推で単位体積流体に働く抵抗力 D を

$$D = -\left(\frac{\mu}{k} + \rho a \frac{|U|}{\lambda} \right) \frac{U}{\lambda} \quad (a: \text{定数})$$

とおかれるに止っている。

なお、岡本はこの吉田の研究を更に高速流、不飽和流へと発展させている¹⁰⁾

8) おわりに

以上の諸研究を見ると、最初直感的あるいは次元解析的に粗く考えられていたミクロからマクロへの方程式の変換が段々と具体的に積分したり平均したりされて変換が行なわれるようになって来たことが分る。

そしてこの過程を通じて、一般の浸透流の運動方程式

を作る目的あるいは N. S 式から Darcy の法則を誘導する目的のいずれによらず、マイクロとマクロの概念や運動方程式の各項についての概念がはっきりして来たことは、これらの研究による成果である。しかし、多くの場合浸透流で最も支配的な力は粘性による抵抗力であることが知られているが、この粘性項についてはマクロへの変換が全く未完成である点は問題である。あるいはこの変換を行なうためにはまた毛細管モデルや球群モデルが必要になって来るかもしれない。これらの事実をどう評価するかは研究の立場なり目的なりによって異ってくるべきものであり、今後の研究にとってもやはりこの点の明確な考慮は必要であると思われる。

引用文献

1) パプロフスキー: Собрание сочинении II (1965)
 2) 本間仁: 地下水流の理論に関する新方法, 土木学会誌 V.

21, No. 7, p. 961~ (1935)
 3) Hubbert, M. K.: Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids, A.I.M.E. Petroleum Trans. V 207, p. 222~ (1956)
 4) 高木俊介: 土壤水の運動機構について, 応用物理, V. 17, No. 8, p. 241~ (1948)
 5) 沢田敏雄: 浸透水の流動に関する研究, 農土研, V. 17, No. 2, p. 57~ (1950)
 6) 中村充: 浸透水運動の基礎理論, 農土研, V. 24, No. 1, p. 40~, No. 4, p. 218~; V. 25, No. 2, p. 117~, No. 6, p. 365~ (1955)
 7) Irmy, S.: On the theoretical derivation of darcy and forchheimer formulas, Trans. A.G.U. V. 39, p. 702~ (1958)
 8) 村本圭一: Darcy 流体論, 修論または, 研究の資料と記録 第10集 (1960)
 9) 吉田昭治: 浸透流の基礎方程式, 農土研, 別冊 No. 1, p. 19~ (1960); No. 5, p. 1(1963)
 吉田昭治: 浸透流の基礎的研究, 山形大学紀要(農学)V.5 No. 3, p. 27~ (1968)
 10) 岡本雅美: porous media を通る流れの特性, 土壤の物理性の研究, No. 3 (1966)

土壌水運動理論の諸系列 (4)

—その内容と評価—

IV Darcy に始まる不飽和流の研究

浸透理論体系化研究グループ 執筆担当 田 淵 俊 雄

Darcy 法則が世に広く知られるようになり、その透水係数の値を支配する要因も19世紀後年に次々と明らかになった。それとともに流れの対象も石油工学や農業土木(水田漏水)の分野等でみられるごとく飽和流域から不飽和流域へと発展し、Darcy 式の応用範囲も広がっていった。また、Darcy から始まる研究以外の分野でも、いろいろの不飽和の領域の流れの研究が進展した。

今回はこれらの不飽和領域の研究の系列について検討を加える。

1. 概 観

Darcy に始まる不飽和流の研究は大別して2つあり、一つは不飽和の透水係数の研究であり、一つは不飽和流の形態やその特性の研究である。

不飽和の透水係数の研究は石油工学関係の Wyckoff, Leibenzon 等によっておこなわれ、含水量と透水係数の関係が調べられた。その後 Childs, Krisher 等によ

って解析されて理論式も提案されるようになり、一方で八幡、黒田等によって気泡の析出による不飽和の透水係数の時間的変化の面にも研究の手が伸びるようになった。

一方不飽和の流れの形態については、日本において数多くの研究があり、それは水田農業と深い関係にあるように思われる。また Darcy 則によらない低含水量領域での流れについては第1報で述べたような畑地農業地域における土壌物理関係の研究があり、最近に至って薄膜水の研究といった新しい側面がソ連の Дерягин 等によって開拓されつつある。

2. 不飽和の透水係数を追って

1) Wyckoff, Botset の研究¹⁾

1936年に Wyckoff と Botset により発表された透水係数 K と飽和度 m の関係を示すグラフは貴重なデータとして多くの本の中で紹介されている。これは気体 CO_2 と水の両方が一諸に流れる状態で実験され、いわば混合流

の状態で測定された K である。彼等の示したグラフの解析は次の世代の研究に委ねられたが、 K と m の一価関係を示した功績は大きい。

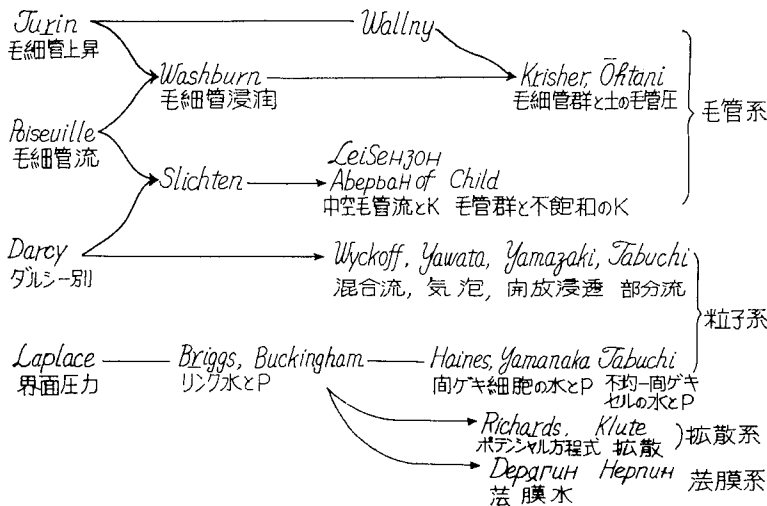


図-1 流れのとらえ方で区分した不飽和流の研究の系列図



図-2

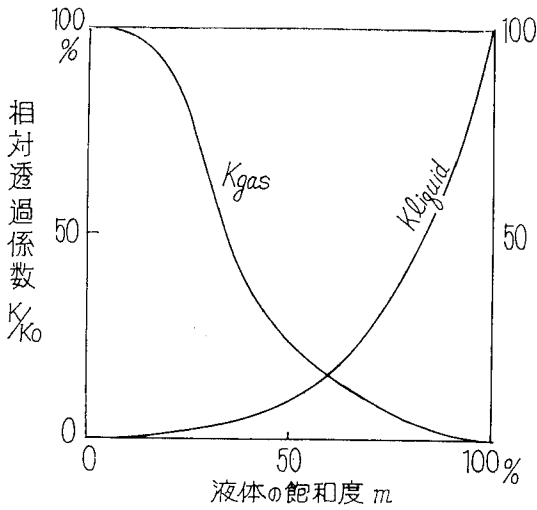


図-3

2) Leidenzon の研究²⁾

Leidenzon は任意の横断面の管の中の液体の運動速度 v を径深を使って次のように表わした。

$$v = \frac{g}{\nu} \frac{1}{\beta} R^2 \frac{\partial H}{\partial y}$$

- v : 運動速度
- g : 重力の加速度
- ν : 動粘性係数
- β : 間ゲキの断面の形によって変化する係数
- R : 径深(間ゲキの断面積 w と潤辺 l の比)
- H : 圧力(水柱高表示)

Великанов は $1/\beta$, R^2 , $\partial H/\partial y$ が互いに独立であるとして平均流速を次のように表した。

$$\bar{v} = \frac{g}{\nu} \left(\frac{1}{\beta} \right) R^2 \frac{\partial H}{\partial y}$$

統計的操作により計算して書き直し²⁾

$$K = K_0 m^3 \varphi(m)$$

$\varphi(m)$ は飽和度 m によって変化する関数で、間ゲキの形の平均値や径深、水面積、潤辺の変動係数や相関係数および比表面積を含んでいる。(詳しくは文献 2)参照)

その後 Аверьянов³⁾ は図のような毛管の中が中空になっている状態を不飽和流のモデルとして考えて、透水

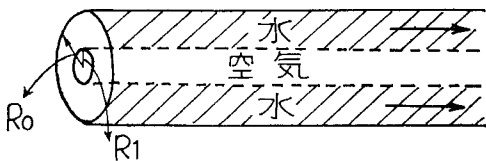


図-4

係数と飽和度の関係を導いた。

均一円筒形毛細管の中の粘性流体の流速を表わす式を使って

$$v = -\frac{r^2}{4\eta} \frac{dp}{dl} + a l_n r + b$$

$r=R_0$ の時 $v=0$, および $\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_{r=R_1} = 0$ の境界条件を使い流量 Q は

$$Q = 2\pi\rho \int_{R_1}^{R_0} v r dr = \frac{\pi\rho}{8r} \frac{dp}{dl} \left[(R_0^2 - R_1^2)(R_0^2 - 3R_1^2) + 4R_1^4 l_n \frac{R_0}{R_1} \right]$$

毛管が満流している時の Q を Q_0 とすれば

$$\frac{Q}{Q_0} = (1 - \rho_0^2)(1 - 3\rho_0^2) + 4\rho_0^4 l_n \frac{1}{\rho_0}$$

$$\text{ただし } \rho_0 = \frac{R_1}{R_0}$$

ρ_0 を飽和度 \bar{w} で表わすと

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{K}{K_0} = \bar{w}(3\bar{w} - 2) - 2(1 - \bar{w})^2 l_n(1 - \bar{w}) \doteq \bar{w}^{3.5}$$

このように Аверьянов は不飽和の流れの透水係数を算定するに当って、Slichter 等が飽和流の場で試みたと同じような毛管流の運動方程式の利用を試みたのである。結論として得た式の形は簡潔で、かつ実際に使うのも面倒でない。しかし得られるのは透水係数の飽和時の透水係数に対する比であって、絶対値ではない。

3) Childs の研究⁴⁾

土の毛管水分分布曲線を説明するのに太さの違う毛管群のモデルが用いられるが、このような不均一な毛管群の中に水が選択的に存在することをもって不飽和な状態を表現する。

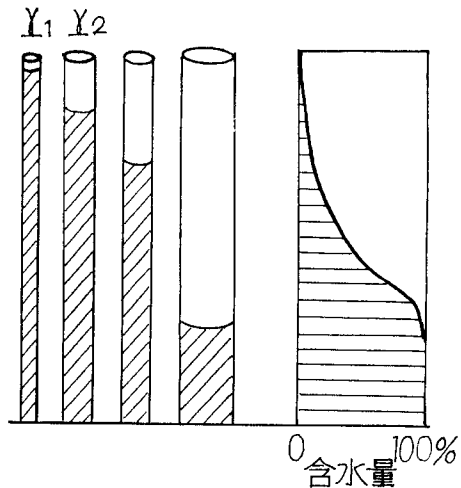


図-5

この考えを Richards は不飽和の流れの運動方程式を立てる時に使ったが Childs と Collis-George は不飽和の透水係数の算出に用いた。土の間ゲキを径の異なる毛管の集合とし、水分が減少する場合には太い毛管から順々に水がなくなるという仮定の下で含水量と透水係数の関係式を導いた。したがって太い毛管には水がなく、細い毛管に水があるという MASS としての不飽和の形態である。故に毛管の一つ一つをとってみれば空であるか満であるかであり、土の中の水の流れが起きている毛管は常に満流であり先に述べた毛管中空型とは違う。だから運動方程式は Poiseuille の毛管流の式がそのまま適用しうることになり新しい運動方程式の誘導は不必要になる。ただし K の計算は含水量だけでは不可能で毛管分布を測定する必要がある。次に簡単に紹介すると Poiseuille の毛管流の式は

$$Q = \frac{-\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$$

$g(r)\delta r$ を 1cm^2 内の半径 r の毛管の本数とすれば

$$\text{その流量 } Qr = -\frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l} \times g(r)\delta r$$

半径 R の毛管までが水で満ちている場合の流量は

$$\sum_{r=0}^R Qr = -\sum_{r=0}^R \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l} g(r)\delta r = -K_R \frac{\Delta p}{\Delta l}$$

$f(r)\delta r$ を 1cm^2 内の半径 r の毛管の面積の全間ゲキに対する割合とすれば、 1cm^2 当り半径 r の毛管の面積 ar は $ar = nf(r)\delta r = \pi r^2 g(r)\delta r$ (n は間ゲキ面積)

上面の径が ρ 、下面の径が σ の毛管の 1cm^2 当りの数は

$$g(\rho \sim \sigma)\delta r = \frac{a\rho \times a\sigma}{\pi\rho^2} \text{ or } \frac{a\rho \times a\sigma}{\pi\sigma^2}$$

$$\therefore K_R = \frac{\pi}{8\eta} \sum_{\rho=0}^R \sum_{\sigma=0}^R (\rho^4 \text{ or } \sigma^4) g(\rho \sim \sigma)\delta r$$

$\sigma < \rho$ とし、 σ によって抵抗が左右されるとみなし

$$K_R = \frac{1}{8\eta} \sum_{\rho=0}^R \sum_{\sigma=0}^R \sigma^2 a\rho \times a\sigma = \frac{n^2}{8\eta} \sum_{\rho=0}^R \sum_{\sigma=0}^R \sigma^2 f(\rho) \times \delta r f(\sigma)\delta r$$

マッチングファクター M を使って

$$K_R = M \sum_{\rho=0}^R \sum_{\sigma=0}^R \sigma^2 f(\rho)\delta r f(\sigma)\delta r$$

これについて Marschall¹⁹⁾ が出した式があるが、これはほとんど Childs 等と同じ考えで、確率を考える時に毛管の面積でなく数を使うところが違っているだけである。

これらの研究は土の間ゲキを毛管型としてとらえた場合には、かなり実態に近づいたといえるが、毛管の太さの変化を2重の組み合わせとして処理する方法は中途半端である。2重にするならば3重でも4重でも良いことに

なり、2重にこだわる理由がないからである。また吸引法による毛管分布の測定が必要である点に難がある。

4) Krischer の研究⁷⁾

これは化学工学の分野で物体の乾燥を研究した Krischer が Childs よりも前に立てたモデルで、径の異なる毛管群を考えるのは Childs 等と同じであるが、その一つ一つの毛管の間の連続性を考えた点が異なる。この「毛管群は互いにいたる所で連続している」という条件は、単なる不飽和流の透水性や毛管水分分布曲線の説明だけにとどまらず水圧と水分量の一個関係やその非平衡にもとづく水分移動さえも説明を可能にした点で重要である。

図のような2本の毛管で考えると、Aの毛管の水面の水圧 $P_A = -c/r_A$ でBの毛管の水面の水圧 $P_B = -c/r_B$ で、 P_A と P_B の間には平衡状態であれば $P_A - P_B = -\rho gH$ が成り立っている。もしもここでA、またはBの毛管の水が増減すると H が変動するからこの平衡は崩れ、AからBへまたはBからAへ水の流れが生じ再び平衡に達する。したがってこの毛管の間の水面差 H は流れのない平衡状態であれば常に一定である。ということは無限に存在する全ての毛管の中の水位の高さの間には一定の相互関係が保たれるように水の運動が起きることを示す。このようにこのモデルは隔絶毛管群では不可能であった各毛管の水圧の差による水の流れの説明を可能にした。

また、これらの毛管の中に水があるかないかの差により、ある水平断面における平均水分量が飽和から0までに変化することを示すが、毛管の中の水柱の高さの差が常に一定であることはこの含水量分布が常に一定の形を示すことを意味している。さらにその水分量に対応した水圧値を示すので含水量と水圧の関係が説明しうるのである。

$$P = P(\theta)$$

従来の毛管モデルは自由水面上の土の毛管上昇の時の水分分布曲線の説明はできたがその中の水分と水圧の一個関係やその圧力差による水分移動については十分な説明ができず、土壌学の分野ではこの点の解決を粒子モデルに求めていたといえる。この点を解決したモデルは高く評価しても良からう。欠点をあげるとヒステリシスの

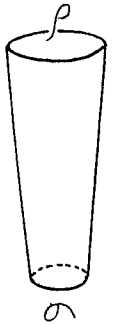


図-6

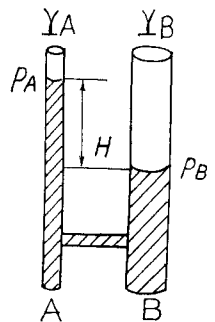


図-7

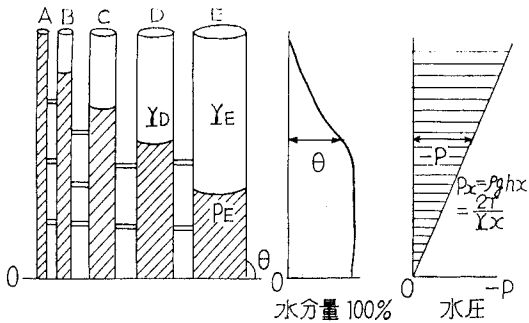


図-8

説明と方向性に難があることである。

なお Krischer, 大谷⁹⁾等はこの $p(\theta)$ 関係を使って定常蒸発下の水の運動方程式を導いた。図の x の高さの断面における水分移動速度 G は各毛管の中の流れに Poiseuille 式を適用すると

$$G = \frac{\pi g_c \rho_w}{8\mu} \left\{ -\frac{\rho_w g}{g_c} \sin \theta + \frac{dp_x}{dx} \right\} \int_{r_{\min}}^{r_x} r^4 \frac{dn}{dr} dr$$

dn は半径 dr 間の毛管の本数である。一般にはこの $n(r)$ の関係が求められないと上式は解けない。しかし $p(\theta)$ の関係を使って書き直すと $p(\theta)$ の関係がわかっているから解けるのである。すなわち

$$r = \frac{2\sigma}{p}, \quad d\theta = \pi r^2 dn \text{ を使って}$$

$$\int_{r_{\min}}^{r_x} r^4 \frac{dn}{dr} dr = \frac{1}{\pi} \int_{p_{\max}}^{p_x} \left(\frac{2\sigma}{p} \right)^2 \frac{d\theta}{dp} dp$$

$$\therefore G = \frac{\alpha g_c \rho_w}{8\mu} \left[\int_{p_{\max}}^{p_x} \left(\frac{2\sigma}{p} \right)^2 \frac{d\theta}{dp} dp \right] \left[-\frac{\rho_w g}{g_c} \sin \theta + \frac{dp_x}{dx} \frac{d\theta_x}{dx} \right]$$

α は補正係数である。

このように導いてくると $p(\theta)$ の関係が一側で与えられる場合には

$$G = K(\theta) \cdot J(d\theta/dx)$$

の形になり拡散型と同じになるのである。

5) 八幡等の研究⁹⁾

次に土の中に存在する気泡の面から不飽和の透水係数を追求した一連の研究がある。

八幡は浸透中の媒体において①気泡は表層から集積し、次第に下層へ延びてゆく。②気泡の集積した部分の K は低下する。③低圧下(負圧)の方が気泡の集積は著しい。④気泡の量があくわずかでも流量低下は大きい。これは間ゲキの中でも流路に相当する部分に気泡が集積するためと考えられると述べた。

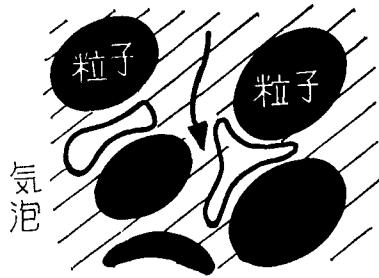


図-9

また Orlob¹⁰⁾ と Radhakrishna は同一気泡量でもその存在位置によって K が変ること、および気泡の存在位置が粒径分布によって左右されることを指摘した。黒田¹¹⁾ は Henry の法則を使ってこの気泡析出量と浸透水圧の関係を求め、その気泡析出量から透水係数の変化を求めて理論化した。

$$V_a = \frac{\Omega}{H_M} (H_0 - H_M) Q$$

V_a : 析出気体体積 cc

Ω : 大気圧下における気体の溶解度

H_M : 浸透水圧

H_0 : 大気圧(水柱高標示)

Q : 浸透量 cc

$$S = 1 - \frac{V_a}{nV}, \quad K = K_s \left(\frac{S - S_0}{1 - S_0} \right)^3$$

S : 飽和度

n : 間ゲギ率

S_0 : 死んだ間ゲギ率

K_s : 飽和透水係数

このようにしてこれらの研究は不飽和の透水係数の解析を気泡の実態の面から追求し、その質的な側面をとらえたのであるが、それとともに、その時間的変化にも研究の手は伸びているのである。

3. 不飽和の流れを追って

1) 秋葉等の研究¹²⁾

秋葉は地下水面上の毛管水帯の水分が地下水の流動にもなつて移動することに着目し、これに誘導毛管水という名をつけて室内実験と野外調査を行った。

そして誘導毛管水の速度を地下水面上の高さ h の関数として導き、それを積分して流量をえた。

このように毛管水帯の水の移動の事実を指摘した意義は大きく、それまでの毛管流を無視した方法への警鐘となった。しかし一方でこのような誘導毛管水と地下水を区別する考えが毛管水帯の水の流れと地下水面下の流れが質的にまったく違うかのような印象を後の研究者達に

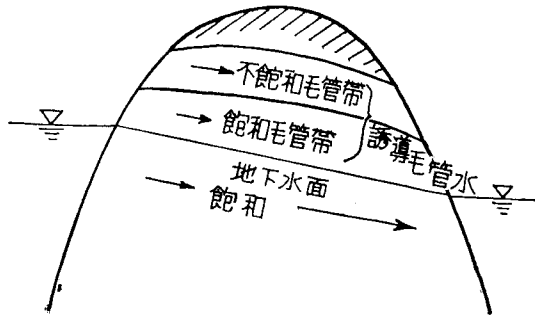


図-10

与えたように思われる。最近になって吉田¹³⁾はこの領域の流れについて若干の実験を行ない、不飽和毛管帯も含めた全域でポテンシャル線と流線は基本的に直交していることを確認し、また自由水面 ($p=0$ の面) は流線とは一致しないことを明らかにした。

すなわち毛管帯の上部では不飽和になるという点ではその下の飽和帯と異なるが、両域でまったく質の異なる流れが存在するわけでないことを示した。

二つの飽和帯の流れが $p=0$ の面を境にして区別されるものでないことは、次に述べる山崎の研究によっても指摘された。

2) 山崎等の研究¹⁴⁾

山崎は成層土層における降下浸透の研究から、流れのマクロな性質として①閉鎖浸透と開放浸透の区別があり、水圧が限界負圧以下になると開放浸透になること。②開放浸透では間ゲキ中に大気と連結した空気が存在し、動水勾配 J が1になること。③開放浸透では負圧値により K が変化し、閉鎖浸透では K は変化せず水圧が負でも正圧浸透と何等変りないこと。を指摘した。

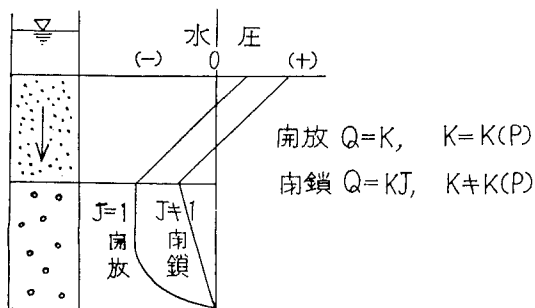


図-11

このように閉鎖浸透と開放浸透が明瞭に区別されたことは、飽和から不飽和への流れの発展の研究上で画期的なことで「水圧が負圧であれば不飽和流で特別な流れに

なる。または不飽和流であれば $K(p)$ の関係がある」という偏見を打破した。

田淵¹⁵⁾、中村¹⁶⁾も山崎の示したことを実験的に確め、特に中村は負圧値との関係について毛管水分曲線を使って意欲的に検討を進めている。

しかしながら現在までに理論的追求が不十分で次の点が未解決のままである。①流れそのものの実態、② $J=1$ になる理由、③ Darcy 式の検証、または開放流の運動方程式の確立。

3) 田淵の研究¹⁷⁾

これは成層浸潤の研究の際に田淵によって発見された流れで、浸透断面のある部分は満流し、ある部分は水が全然ないという流れで部分的流れと名づけられている。空気が大気とつながっていてしかも水圧が正の場合にはこのような部分流は起りえないが、水圧が負でしかも粒子層の毛管負圧よりも (-) 側であれば気水界面は気体側へ移動せずに流れは部分流として存在する。運動方程式は流れが満流状態をとるので Darcy 式で代用できる。浸潤の際部分流になる条件式は

$$q_l < K_2$$

$$Q \doteq q_l A = K_2 a$$

ただし $q_l = K^1 \left(\frac{h_0 + h_{e2}}{l_1} + 1 \right)$

a は部分流の断面積。降下浸潤時および浸潤後の浸透では部分流の部分の断面積 a は深さ方向にはほぼ一定で $\frac{q_l}{K_2} A$ の値に等しくその動水勾配は1になる。

実際の流れの中にこのような部分流が出現したことは重要な意味もっている。なぜなら流れの部分は飽和で、流れのない部分は乾燥状態でありながら、マクロに全体をとらえると

$\frac{a}{A}$ という値の飽和度をもつ不飽和状態となるからである。そしてその平均的な透水係数 \bar{K}_2 は $\frac{a}{A} \bar{K}_2$ となる。

4. その他の不飽和の形態

ここでは上述した Darcy に関連した研究以外の所で現れた不飽和の形態を簡単に紹介する。

1) 田淵の研究

Briggsが粒子層のリング水に着目したのに対し、Haines¹⁸⁾ や山中¹⁹⁾ は粒子層の間ゲキセルの水の出入に着目し、このセルからの水の脱水や浸水現象を解析した。間

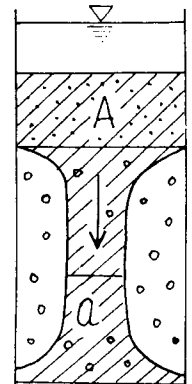


図-12

ゲキセルとしては Slichter²⁰⁾ と同じく均一球状粒子(いわゆる理想土壌)の疎充填と最密充填を考え、セルの大きさからそこに形成される界面の負圧値を求めた。そしてその最大負圧値(ネックに相当)からそこのできるメニスカスの破れる限界の圧力差(entry pressure という)を求めた。

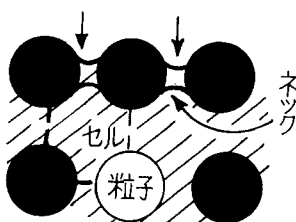


図-13

すなわち、最密充填の間ゲキセルの中の界面の示す圧力は山中によると

$$P = \frac{-2T}{R} \cos \theta$$

$$R = \frac{r}{\sqrt{r^2 - H^2}} \left(\frac{2\sqrt{3}}{3} r - \sqrt{r^2 - H^2} \right)$$

T : 表面張力 θ : 接触角

r : 粒子の半径 H : ネックから界面までの高さ $H=0$ の時の界面がネックの界面に相当し

$$R \approx 0.15r$$

$$P_1 = -12.9 \frac{T}{r} \cos \theta$$

疎充填の時

$$P_2 = -4.8 \frac{T}{r} \cos \theta \approx \frac{-1}{3} P_1$$

逆にセルへ水が浸入する時の最小の p は最密充填で

$$P_3 = -2 \frac{T}{r} \cos \theta \approx \frac{-1}{6} P_1$$

このようにして彼等は間ゲキセル中の飽和から含水量 θ にいたる水分段階に水圧変化を対応させることに成功した。これは Briggs によるリング水段階の $p(\theta)$ 関係を高含水量領域へも発展させたのであり、その功績は大きい。

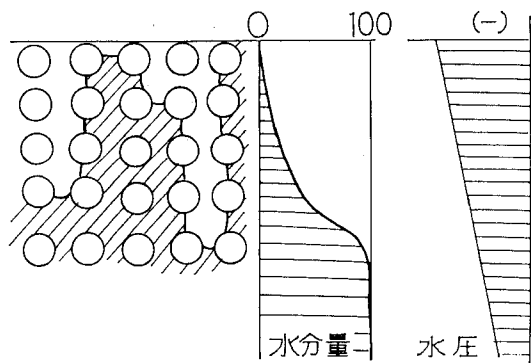


図-14

しかしこの理論では水圧が限界水圧にまで低下すると一斉に間ゲキセルに空気が入り、含水量は飽和からほとんど不連続的にリング水の低含水量領域に低下することになる。したがって毛管水分分布曲線のような連続的な水分変化は説明できず、したがって不飽和領域での水の移動を説明することもできなかった。

田淵²¹⁾は間ゲキセルに、不均一性の概念を導入して確率的扱いをおこなった。

これは間ゲキセルの不均一性(具体的には間ゲキセルとセルの間のネックの大きさの不均一性)にもとづくもので、水がある負圧を示す時にあるネックの界面は開きある界面は開かないとする。この開く開かないはその界面の大きさによって決ることで、ある負圧 p に対して確率 $f(p)$ で与えられるとする。そしてあるセルが水によって飽和しているかまたは空気によって占められるかは、そのセルと大気とを結ぶ無数のルートの通過確率の和 F として計算される。

この F によって粒子層の中の水が満ちたセルと空のセルの割合が決り、その数で含水量が定まる。

式は複雑なので一般化した形で示すと第 n 層目の F は n が 20 以上になると収斂するので

$$F_n = F(f), \theta = \theta(F) = \theta(f)$$

$f = f(p)$ だから $F = F(p)$ で F は p のみの関数になる。 $f(p)$ はセルの大きさの分布式から求め、 p の値は水平と鉛直の各々によって次のようにして考えられる。

$$\begin{cases} \text{水平方向の時} & p = p_0 = \text{const} \\ \text{鉛直下方の時} & p = p_0 + n h \rho g \end{cases}$$

p_0 : 表面の水圧(負の値をとる)

p : 水圧

h : 粒子一層の厚さ

n : 層数

こうして含水量は負圧 p の関数で表われる。ただし水が飽和粒子層から脱水する時と乾燥粒子層へ浸入する時とでは $f(p)$ の値が違ふから含水量と負圧の関係も異なる。

田淵はこれを使っても毛管水分分布曲線と吸引曲線を計算で求め、実験と比較した。

これにより Haines のモデルでは不可能であった水分分布曲線や不飽和状態の水の移動の説明ができるようになった。いわば毛管系の Krischer モデルに相当するものが作られたのであるが、運動学的な面の研究はまだなされていない。

今後、山崎、中村等の研究と結びつくことが期待される。

2) Klute 等の研究²³⁾

第1報で述べたように、Richards²²⁾は含水量と水圧の関係については粒子系のリング水モデルに立脚し、運動方程式は毛管系の Poiseuille 式に依拠しており、いわば両モデル系の便利な点を加え合せて使った。したがってこれは毛管モデルでもないし粒子モデルでもない。

また、現在では毛管ポテンシャルよりは水分ポテンシャルということばを用いていることにも現われているように水分量の差によるポテンシャル差が流れの駆動力とされており、その運動方程式の形や研究の手法と考え合わせて拡散型の流れと考えるのも良いであろう。

3) Дерягин 等の研究

含水量が極めて小さい場合には Коляев²⁴⁾によれば間ゲキの壁に沿った薄膜水の移動が水分移動の中心となる。

このような薄膜水の移動は Дерягин²⁵⁾等によって研究されているが近着書“Физика Почвы (土壤の物理 Нерпин, Чудновский 著)によれば、彼は薄層の流れの基本方程式を連続方程式、ナビエストークス式、熱移動の式から導き、次のような結果をえた。

薄層の表面に垂直な方向に x 軸をとり、平行な方向に y, z 軸をとり

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = 0, \quad v_x = 0, \quad \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad \frac{\partial v_z}{\partial z} \ll \frac{\partial v_y}{\partial x}, \quad \frac{\partial v_z}{\partial x}$$

とみなして

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_y}{\partial y} &= 0 \\ \eta \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} &= -\frac{\partial p}{\partial z} - Z \\ \eta \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} &= -\frac{\partial p}{\partial y} - Y \\ \frac{\partial p}{\partial x} &= X \\ \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial z} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} &= -\frac{K}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{2\eta}{\rho c_p} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \end{aligned} \right.$$

v_x, v_y, v_z : x, y, z 方向の速度成分

η : 粘性係数

p : 圧力

X, Y, Z : 単位容量に作用する質量力

t : 時間

T : 絶対温度

R : 熱伝導係数

ρ : 密度

c_p : 等圧熱容量

さらに考察を進めて

$$\left\{ \begin{aligned} p &= p_{cl} = p_\phi + \Delta p_r - \phi_m - \phi_i \\ \phi &= \phi_m + \phi_i = \phi(H \cdot T \cdot C) \\ \Delta p_r &= f(r_1, r_2, T \cdot C) \\ X &= X_g, \quad Y = Y_g, \quad Z = Z_g \end{aligned} \right.$$

p_{cl} : 薄層の表面圧

p_ϕ : 薄層の接する相の圧力

Δp_r : ラプラスの圧力差

ϕ : クサビ圧力

ϕ_m : 分子力による成分

ϕ_i : イオン力による成分

r_1, r_2 : 曲率半径

C : 濃度

H : 薄層の厚み

X_g, Y_g, Z_g : 重力の成分

次にこの基本方程式を解いて次のような速度を表わす式をえた。

境界条件: $x = a$ のとき $v_x = v_x', \quad v_y = v_y'$

$$x = H \text{ のとき } \eta \frac{\partial v_x}{\partial z} = \tau_x, \quad \eta \frac{\partial v_y}{\partial y} = \tau_y$$

$$\left\{ \begin{aligned} v_x &= v_x' + \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial p_{cl}}{\partial z} - z_g \right) (x^2 - a^2) + \frac{1}{\eta} \left[\tau_x - \left(\frac{\partial p_{cl}}{\partial z} - z_g \right) H \right] (x - a) \\ v_y &= v_y' + \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial p_{cl}}{\partial y} - Y_g \right) (x^2 - a^2) + \frac{1}{\eta} \left[\tau_y - \left(\frac{\partial p_{cl}}{\partial y} - Y_g \right) H \right] (x - a) \end{aligned} \right.$$

$$v' = v(T \cdot V \cdot C), \quad \tau = \tau(\sigma)$$

$$\sigma = \sigma(T \cdot C)$$

V : 電場ポテンシャル

σ : 表面張力

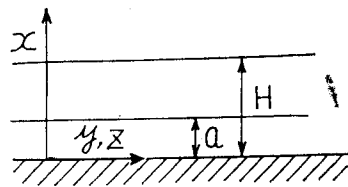


図-15

a は流れに関係しない吸着単層や溶媒層の厚みである。平均流速 v_{cp} は前式を積分して

$$\left\{ \begin{aligned} v_{cp} &= \beta \frac{\partial T}{\partial z} + \nu \frac{\partial V}{\partial z} + \mu \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{(H-a)^2}{3\eta} \\ &\quad \times \left(\frac{\partial p_{cl}}{\partial z} - z_g \right) + \frac{H-a}{2\eta} \frac{\partial \sigma}{\partial z} \end{aligned} \right.$$

表-1 不飽和の形態の色々

	研究者	運動方程式	$K(\theta)$	$P(\theta)$	間グキ	備考
毛管中空型	Аверьянов Leidenzon	Poiseuilleの変形	ア リ	—	均 一	
" 選択(隔絶)型	Wollny Childs	— Poiseuille 式	ア — リ	ア — リ	不 均 一	毛管群の滴か空
" 選択(連結)型	Krischer	Poiseuille	ア リ	ア リ	不 均 一	毛管群の滴か空
粒子層中空型	Briggs et.	伝導型	ア リ	ア リ	均 一	リング水
" 選択型	山崎, 中村 田淵	Darcy	ア — リ	ア リ ア リ	不 均 一	開放浸透 不均一セル
" 部分選択型	田 淵	Darcy	K(a)	$p = -hc$	不 均 一	部分流
" 気泡型	八幡, 黒田	Darcy	ア リ	ナ シ	—	閉鎖封入流
" 混合型	Wychoff	Darcy	ア リ	ナ シ	—	混 合
拡散型	{Richards Klute	PoiseuilleとDarcy 拡散型	ア . リ	ア リ	均 一	
薄膜型	Дерягин	N. S式より	ア リ	ア リ	—	

$$v_{env} = \beta \frac{\partial T}{\partial y} + \nu \frac{\partial V}{\partial y} + \mu \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{(H-a)^2}{3\eta}$$

$$\left(\frac{\partial p_{el}}{3\eta} - Y_g \right) + \frac{H-a}{2\eta} \frac{\partial \sigma}{\partial y}$$

β, ν, μ は熱容量, 溶質のイオンや分子の分布状況により変る係数

このようにこの派の研究はわれわれの想像以上に進んでいるようである。今後どこまで発展し, 実用化されるかはまだわからないが, Briggs に始まった低含水量領域の不飽和の流れの研究の正統な方向を目指しているように思われる。

5. 要 約

- (1) いろいろの不飽和流の形態やモデルが存在することがわかった。
- (2) 流れの研究としては, 運動方程式を把握することが必要であるが, それに加えて不飽和流の場合には液-気界面が存在することによる界面圧力と含水量の変化を表現することが必要になる。この表現のためにモデルが使われている。
- (3) 不飽和の流れのモデルとしては毛管系と粒子系の二つの潮流がある。毛管系には Poiseuille 式と Jurin の式が使われ, 粒子系には Darcy 式と Laplace 式が使われている。一般的には毛管系の方が運動を表現するのに便利で, 粒子系の方は水圧と含水量の関係を表現するのによりわかりやすく, 従来の研究もこの特長をとって行なわれている。
- (4) 現在われわれの周囲で土壌の水分系を研究する人達

の間にモデルの不在また混同利用があるように思える。たとえば吸引法の水分曲線や毛管水分分布曲線をいろいろの場合に利用しているが, それらの人達は上述した意味ではっきりしたモデルをもっているのだろうか。もっている場合にもそれは一貫したモデルであるのだろうか。

(5) また不飽和における開放系と閉鎖系の相異も当然のことながら念頭におかなければいけない。特にこのことは水圧含水量関係が一価であるか否かにとって重要な条件である。

(6) こうして調べてくると粒子系も毛管系も基本的な流れの形態またはモデルは出そろったという感じであり, 不飽和流の総括がそろそろできる段階に来ている。ただし薄膜水や蒸気移動を伴う水の運動の研究はまだこれからであろうし, 土としては粒子系と毛管系以外の構造の中の流れの研究もこれからである。

(7) 最後にここに出てきた不飽和の実態およびモデルを私なりにまとめて表にした。勝手な名前をつけさせていただいたが, この点はお許し願いたい。

文 献

1. R. D. Wychoff, H. G. Botset: The flow of gasliquid mixtures through unconsolidated sands, Physics 7, 325~345, 1936
2. アー, イー, ブダゴフスキイ: 土壌中への水の浸潤, 研究の資料と記録(東大農地工学研究室) 9, 1-93, 1955
3. С. Ф. Аверьянов: Забисимоств водопроницаемости почвы-грунтов от содержания в них воздуха, Д. А. Н СССР. No. 2, 141-144, 1949

4. E. C. Childs, N. Collis-George : The permeability of porous materials, Pro. Roy. Soc. Vol. 201 A, 392--405, 1950
5. T. J. Marshall : Relations between water and soil, C. A. B. 1959
6. 長田昇 : 土壌の通気性に関する実験的研究 1. 2. 3 農土研別冊 7. 37~53, 1963
7. O. Krischer : Grundgesetze der Feuchtigkeitsbewegung in Trockengütern, VDI-Zeitschrift Bd 82. Nr 13 373--378 1938
8. 大谷茂盛, 前田四郎 : 湿った粒状物質内における水分移動の機構, 化学工学 28 (5) 362- 367, 1964
9. 八幡敏雄 : エヤーバインディングによる土の透水性低下について, 研究の資料と記録 10, 1-32, 1960
10. G. T. Orlob, G. N. Radhakrishna : The effects of entrapped gases on the hydraulic characteristics of porous media, Trans. Amer. Geophys. Union 39 (4) 648-659, 1956
11. 黒田正治 : 溶解気体による不飽和浸透の発生と浸透性 農土論集 13. 1-6, 1965
12. 秋葉満寿次 : 誘導毛管水の研究 東京帝国大学農学部農業工学教室研究第一輯 1942
13. 吉田昭治 : 浸透流の基礎的研究 山形大学紀要 (農学) 第5巻 第3号 1968
14. 山崎不二夫 : 成層土壌の降下浸透に関する研究 研究の資料と記録 6, 1-30, 1958
15. 田淵俊雄 : 浸透における間ゲキの開放と閉鎖に関する実験 研究の資料と記録 11, 10-12, 1960
16. 中村忠春 : 毛管浸透における2つのタイプについて 土壤物理研究 No. 3. 17-20. 1966
17. 田淵俊雄 : 浸潤とそれに続く浸透II 農土研究別冊2 1961
18. W. B. Haines : Studies in the physical properties of soils IV, J. Agr. Sci. 17. 264-290, 1927
19. 山中金次郎 : 土壌の凝集力に関する研究 農研報告 B 6 1955
20. C. S. Slichter : Theoretical investigation of the motion of ground water, U. S. Geol. Survey 19th the Ann. Rept. 2 1898
21. T. Tabuchi : Theory of suction drain from the saturated ideal soil, Analysis of capillary moisture distribution curve. Soil. Sci. Vol 102 No. 161-166 1966 Experiment on suction drain from an ideal soil, Soil Sci. 102 (5) 329-332 1966
22. L. A. Richards : Capillary conduction of liquids through porous mediums, physics 1, 318-333. 1931
23. A. Klute : A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials, Soil Sci. 73, 1952
24. Ф. Е. Колясев : Подвижность воды ВодвВ Почве Иекоторое лчти ее регчлироваиця, Вопросц Агрономической Фцзпкц, 11-29
25. Б. Б. Дерягин : К одределению Закономерностей передвиженця почвенный влатц
同 上 30-40 1957
26. С. В. Нерлчн : А. Ф. Чдновский : Физцка Почвч 1967
27. 土壤水運動理論の諸系列 1. 土壤の物理性 13, 54-62 1965
28. 同上 2, 土壤の物理性, 11. 15, 33-40
29. 中野政詩 : 毛管ポテンシャルによる不飽和運動理論の歴史 土壤物理研究 No. 3. 2-5. 1966

会 務 報 告

(昭和43年4月1日～10月31日)

(1) 幹事会

4月24日 15時 東大農学部

〔出席〕 増島, 岩田, 土井, 中野, 竹中

1. 会誌18号の編集進捗状況
2. 研究者リストの作成について
3. シンポジウムのテーマについて

(2) 幹事会

5月21日 15時 東大農学部

〔出席〕 八幡, 国分, 増島, 岩田, 中野, 福桜, 竹中

1. シンポジウムの内容と講演者の検討
2. 規約改正案(役員選出方法)の検討
3. 次回在京評議員会の提出議案検討
4. 会誌19号の編集について

(3) 幹事会

6月21日 10時 東大農学部

〔出席〕 八幡, 国分, 増島, 岩田, 土井, 中野, 竹中

1. シンポジウムの講演者選定
2. 規約改正案の検討
3. 会計内容の検討

(4) 在京評議員会

6月21日 15時 東大農学部

〔出席〕 八幡, 国分, 山崎, 美園, 横井, 山中, 田原
各評議員, 増島, 岩田, 中野各幹事

1. 会務執行状況報告
2. 10周年記念行事について
3. 規約改正案について
4. 松実氏の評議員辞任, 真下氏の新任を承認

(5) 幹事会

9月10日 15時 東大農学部

〔出席〕 八幡, 増島, 岩田, 中野, 福桜

1. 研究者リストの作成
2. シンポジウムの運営について
3. 19号の編集について

(6) 幹事会

10月19日 10時 東大農学部

〔出席〕 八幡, 国分, 増島, 岩田, 土井, 中野, 竹中

1. 19号の編集について
2. 予決算について
3. シンポジウムの運営について
4. 総会の運営について

(7) 幹事会

10月21日 15時 農技研

〔出席〕 岩田, 中野, 竹中

1. シンポジウムの運営について
2. 総会の運営について

(8) 昭和42年度会計決算(42年9月29日～43年10月17日)

収入	費目	予算	決算	備考
(1)繰越金		324,412	324,412	
(2)会費		300,000	156,550	314人分
(3)賛助会費		110,000	50,000	10社分
(4)出版物売上		20,000	58,300	146部分
(5)広告料		60,000	47,000	
(6)雑収入		60,000	51,591	展示料, 利子, 送料等
(7)合計		874,412	687,853	

支出

支出	費目	予算	決算	備考
(1)会誌製作費		400,000	312,300	17号, 18号
(2)討論会費		70,000	63,272	ポスター製作発送, 会場設営・運営
(3)通信, 会誌 郵送費		50,000	45,065	17, 18号他通信
(4)文具費		10,000	9,370	封筒, 感光紙他
(5)交通費		10,000	8,680	幹事交通費
(6)賃金		30,000	13,540	編集, 会誌発送
(7)会議費		10,000	12,485	幹事会・評議員
(8)予備費		24,412	23,780	振替料, 幹事手当
(9)次期繰越金		270,000	199,361	
(10)合計		874,412	687,853	

(9) 昭和43年度予算案(43年10月～44年9月)

収入	費目	予算	備考
(1)繰越金		199,361	
(2)会費		450,000	のべ900名分
(3)賛助会費		90,000	9社
(4)出版物売上		50,000	125冊
(5)広告料		60,000	
(6)雑収入		50,000	展示料他
(7)合計		899,361	

支出 費 目	予 算	備 考	(7)賃 金	30,000
(1)会 誌 製 作 費	450,000	19, 20号	(8)会 議 費	15,000
(2)討 論 会 費	100,000	10周年記念シンポジ ウム	(9)役 員 手 当	30,000
(3)評 議 員 選 挙 費	50,000	名簿作成, 投票用紙製 作, 郵送費他	(10)予 備 費	24,361
(4)通 信, 会 誌 郵 送 費	60,000	19, 20号	(11)次 期 繰 越 金	120,000
(5)文 具 費	10,000		(12)合 計	899,361
(6)交 通 費	10,000			

編 集 後 記

秋も深まり、そろそろ紅葉の便りの聞かれる頃となりました。外ではカンナ、サルビア、芙蓉、おしろい花が散り初め、パンパスグラスやすすきの白、萩や彼岸花の赤が盛りを迎えようとしている今、この後記を記しておりますが、皆様のお目にとまる頃はもう寒さを感じる候となっていることでしょう。

ここに会誌第19号をお届けします。

第10回目に当ります、十周年記念シンポジウムをひかえての号ではありますが、これまでと同じように、それにとらわれず編集してみました。シンポジウムの内容に

つきましては、講演者の皆様をお願いしまして要旨を掲載させて頂きました。また、総会の運営をより円滑にし、あわせて討議の徹底を期するために、新たに総会試案を載せることに致しました。活用して頂ければ幸いです。

当会誌も、だんだんに自由投稿が多くなって参りました。会のためには欣快にたえず、これも会員諸兄の熱意の賜物と喜びを新たにしております。

(編集幹事 増島, 上井, 多田, 福桜, 岩田)

10周年記念シンポジウム

日 時 11月22日(金) 9:30~17:00
場 所 農林省農業技術研究所大講堂(北区西ヶ原)

プログラム

I. 記念講演

- | | |
|-------------------------|----------------|
| ○土壌物理学研究の現状と将来 | 米 田 茂 男 (岡山大) |
| ○土壌物理研究と農業実際面との結びつきについて | 山 田 忍 (美唄農工短大) |

II. シンポジウム「最近の研究の進歩」

- | | |
|----------------|------------------|
| ○土壌物理の測定手段について | 土 井 淳 多 (東大) |
| ○土壌中の水の運動について | 田 淵 俊 雄 (東大) |
| ○土壌構造について | 長 田 昇 (三重大) |
| ○土壌の力学的挙動 | 東 山 勇 (山形大) |
| ○赤黄色土の物理性と有機物 | 湯 村 義 男 (東海近畿農試) |

講演要旨

土壌物理学研究の現状と将来

米 田 茂 男 (岡山大)

土壌物理の研究領域

わが国の土壌物理の研究は、土壌学の1分科であると同時に、農地の土木技術に対する基礎学科の1つとして、かなり広い領域において行われてきた。研究の方法、目的によって、応用物理学の1分科の性格をもつ基礎研究と、生産体としての土壌の物理性の向上を究極目的とする農学の1分科としての応用研究に二大別できる。

土壌物理研究会の会員は、数的には土壌学徒と農業土木学徒を2本柱として構成されているが、この両者間で研究の方法、目的などは、かなり趣を異にしている。たとえば、前者に属する研究者の多くは、研究の基礎を物理化学やコロイド化学に依存するのに対して、後者では物理学や力学を基礎としている傾向が認められる。また応用研究において、前者は作物の生育培地として土壌を取扱う場合が多いのに対して、後者は農地の土木なる見地

からの研究対象とする場合が多い。

次に研究領域を、BAVERの Soil Physics, 八幡らの土壌物理実験法, SHAWの Soil Physical Condition and Plant Growthなどを参考として、やや具体的に考察する。

土壌物理研究の現状

土壌物理研究の現状を、まず土壌肥料学会および農業土木学会の過去10年間の大会講演要旨に発表された論文ならびに農業土木学会の研究動向調査について検討し、次に演者がまとめた過去3年間の、わが国の土壌物理に関する進歩総説および Soils and Fertilizers 誌に収録された諸外国の研究論文について、テーマ別にその実態を解析する。土壌物理に関する講演数は、土肥学会で12.4~20.1%、農土学会で9.6~22.5%、また Soils and Fertilizers の収録論文は過去3カ年平均13.3%を示した。

次に研究の成果，焦点などについて概況を述べる。

研究の将来

まず大学における教育態勢をみるに，農業工学科においては，その半数以上で土壤物理学なる講義科目が掲げられ，かつ土壤物理学実験は全学科で行われている。これに対して現在農芸化学科に属している土壤学講座（研究室）における土壤物理学の将来と，そのあり方につ

いて十分に考慮する必要がある点を指摘したい。

次に研究面については，計測方法とその精度，土壤物理研究におけるアイソトープの利用，水田土壤の物理性と関連して液性形態や粘着可塑性形態における土壤の行動，農業土木におけるレオロジカルの手法の導入，さらには土壤物理学を媒介としての研究グループの構成などの問題が指摘できよう。

土壤物理研究と農業実際面との結びつきについて

山 田 忍（専修大学美呷農工短期大学）

土壤に関する研究はその分野とか，基礎，応用の如何を問わず，最終の目標は農業の実際面に活用して成果を挙げるにあると思う。

今回は農業土木分野で農業の実際面に重要な役割を果たしている排水と客土について，研究と実際面の結びつきについて考えて見度い。

水稻については灌漑水の掛引きが収量に大きな影響があるため，排水も灌漑も常に水稻の生育との関連を保ちながら行われ，それなりの効果を挙げている。

畑地における排水の目標は作物を湿害から守るにあると思う。ところが排水の実際が果たして作物の生育とか土壤の性質とかと関連がとれているであろうか。

作物はその種類によって同じ条件でも湿害を受ける程度にちがいがあり，一つの作物についても生育時期のちがいにより湿害の受け方がちがう筈である。又同じ降雨量であっても土壤の種類によって土の中の水の動きがちがうにも拘らず畑地における暗渠，排水の実際面を見ると，その深さが劃一的に1米前後であったり，北海道における畑地の排水の基準が最近10ヶ年平均1日最大雨量の40%を7日間に排除することになっているなど，作物生育との関連性が余りとかけていない。そこに排水施設をしてもきく，きかないの問題のおきる原因がひそんでいる。

客土はある土壤に他の土壤をまぜることによって土壤本来のもつ欠かんを直すことに目標がある筈である。泥炭地の改良に客土は大きな効果を示している。泥炭地の水田は水持ちが悪い，泥炭地の畑地は乾燥すると雨水を滲透させない性質があるため下ばつにかかる。そこで泥炭地の水田では水持ちのよい粘土を被ふくして新しく作土をつくり，畑地では毛細管のきく砂土型の土壤を作土にまぜて，何れも水分調節に役立たせている。しかし泥炭地の客土については泥炭土に欠く養分の補給という化学的のききめは，水持ち調整の理学的のききめに勝るとも劣らない。新に硅酸を補給してイモチ病の被害を軽減して北海道の泥炭地水田の安定化に大きな貢献をなしていることは最も重要視しなければならぬ点である。そしてこのようなことは他の土壤に対する客土についてもいえる。客土は土壤の種類別，地目別にそのねらいとえらぶ土壤にちがいのあることを知らねばならぬ。

現在客土事業に対して補助金交付の制度がある。そしてその基準が主として土性改良にありとしているから，実際には補助を受けるため客土のねらいをまげている場合が少くない。土壤の改良は理学的，化学性などお互に関連があり割切れるべきものでもない。こうしたことを念頭において客土のねらいが実時事策に十分生かされるようそれぞれの関係分野の一考を望み度い。

土壤物理の測定手段について

上 井 淳 多（東京大学 農学部）

測定対象は土壌物理に対する基本的考え方によって決められるが、また逆に測定手段により対象への接近の度合、方法が規制され土壌物理の概念が影響を受ける。現在、土壌物理に関する研究の多くは、土壌鉱物(固相)、水分(液相)、空気(気相)の三成分について、それぞれの、例えば重量、体積、密度、粒度、孔隙、水分、水頭、空気量などの諸量と、二成分あるいは三成分にわたる応力、応力分布、変形、コンシステンシー、地耐力、透水、空気移動、温度、熱容量、熱伝達率などの諸量に大きく分類できる。

これら対象別の諸量は、直接にあるいは各種物理法則または物理効果により内容的には変位、速度、加速度、力、圧力、ひずみ、エネルギー、時間、温度、湿度、密度、質量、流水、粘度、面積、体積、光、放射、インピーダンス、電流、電圧、磁束などのより基本的な諸量の計測に帰着できる。ここでは上記諸量のなかでも特に応用面の広い計測手段として、変位、ひずみ、応力に関す

る測定法とレーザなどを応用した特に低レイノルズ数領域における流量測定に関する最近の事例を紹介する。

次に測定された結果は何らかの処理を加えられることが必要で、従来は読取データあるいは線書きされた曲線を読み取って、必要に応じ電子計算機などを用いてオフラインで処理することが行なわれてきた。近時は更に進んで、これら実験で得られる諸量を実時間(リアルタイム・オンライン)で計測処理することのみならず、実験そのものをモニタし、制御することも可能となってきた。このような方法により実験の効率を上げることができ、中間あるいは最終結果をグラフ以外に、カード、紙テープなど最も望ましい形で保管することができる。また実験遂行に当り現在の処理結果をすぐ次の実験に役立てることができ、対象を希望の値に制御する直接デジタル制御(Direct Digital Control)システムも可能となる。このような実時間実験処理制御装置については東京大学農学部において計画中のものを中心にして報告する。

土壌中の水の運動について

田 淵 俊 雄(東大農)

土壌水の運動の研究は2つの大きな流れに分類される。1つは飽和流の研究で流体が土の中をほぼ飽和に近い状態で流れる場合であり、第2は気体が流体の中に介在する不飽和な流れである。ごく大まかにいえば前者が水田土層の中の水の流れで、後者が畑の中の水の流れである。

飽和流の研究は Darcy により始まり、次いで Darcy 則の検証やその透水係数の検討がおこなわれた。それによって Darcy 則の適用範囲の確定や透水係数に影響する要因～温度、粒度、間ゲキ率、飽和度がわかった。

そして最近では間ゲキの量だけでなく質的な面の追求もおこなわれ、間ゲキの大きさやつながり状態等、土の構造面と透水係数の関係が研究されてきている。

また気泡の折出、消滅による飽和度の変化とそれによる透水係数の変化といった不飽和流の動的な面も飽和流の研究の中から生れた。

さらに不飽和の流れの中にも開放と閉鎖といった質的に違う流れがあることも指摘され、不飽和の質的な側面

が色々のケースについて追求されるようになった。

また浸潤と呼ばれる土の中に水が侵入していく現象について、浸透能といわれた時代から一歩研究が進み、基本的な理論が確立されつつある。

一方で含水量の小さい領域の不飽和流の研究は Briggs 以来、次第に拡散型方程式の解法へと研究の中心が進んだ。しかし近年になって、それを実証的に確かめようという反省がいろいろ生れてきている。その1つが Roge のような土壌水を実態的に分類しその1つ1つについて運動を調べていこうという行き方である。

また Дерягин 等は低い含水量の水を薄膜水としてとらえて研究を進めている。

以上のように、近年になって土壌水の運動は各方面において1つの特徴的な傾向がみられる。それはある出来上がった段階～大体において理論的色彩の強いものだが～から土の中の水の流れの実態に根ざした研究によって脱皮しようとしている姿である。

土 壌 構 造 に つ い て

長 田 昇 (三重大農)

土壌構造を『土壌の骨格を形成する、土粒子またはその集合体の空間的配列様式』と定義すれば、土壌の物理性は多かれ少なかれ土壌構造に関係している。したがって、ある意味では土壌の物理性に関する研究は、土壌構造の研究ともいえるわけであるが、ここでは主として土壌構造そのものに直接関与する分野の研究成果について、最近の進歩のあとをたどってみたい。

1) 土壌団粒に関する研究

土粒子の集合単位としての土壌団粒に関する研究の進歩はいちじるしい。傾斜地の農業的開発利用や畑地かんがいの普及につれて畑土壌の生産性、ことに耐食性、水分の保持・流通の媒体として土壌団粒のはたす役割が問題とされるようになった。ここで、火山灰土壌を中心とする研究の中で、微細団粒の意義が明らかにされてきた。

また、高分子接着剤の進歩につれて、クリリウムなどの土壌改良剤の研究が進み、それにともなって、土壌団粒の生成崩壊などの機構に関する研究の進展がみられた。

2. 水田の土壌構造に関する研究

畑地の土壌構造の研究とともに、多収穫水田の生産性に関する研究がはじめられた。また、水田の土壌構造の形態的分類についての試みが提案された。それはわが国独自の研究で、水田土壌の透水性に深いつながりがあり、従来の Zakharov 以来の分類にくらべて、わが国水田土壌の特異性が浮きぼりにされている。

3. 火山灰土壌の土壌構造に関する研究

火山灰土壌、とくに関東ロームの物理性についての研究にとって、その水分移動、力学的挙動の解明に土壌構造のモデル化が大きな役割をはたした。そこでは土壌構造を肉眼的観察によって形態分類する立場とは異なり、物理的挙動との関係で機能的な意味づけの立場から土壌構造がとらえられた。その測定の手段には、顕微鏡薄片の観察とともに、透過性、力学的性質などが使われている。

このような土壌構造の研究成果から、地質母材と土壌構造との関連性が明らかとなってきた。たとえば、それは三相構造の研究の中に反映している。

土 の 力 学 的 挙 動

東 山 勇 (山形大農)

農機具や土木施工機械の発達は、それまで主に水分保持や水の運動に注目していた土壌物理研究者の目を工学的な課題に向けさせた。新しい農業が当面する問題に 대응するような土壌の姿が描かれる必要があり、「工学における土壌学」の役割(須藤)が痛感されたからである。

湿田・干拓地などにおける機械の走行性や作業難易の判定は、W. E. S. 型のコーンの導入にはじまり、測定

法の改善や機構の解明が積み重ねられた(金須, 田中, 藤川, 田地野)。硬盤との関連(長崎, 浪瀬), 土壌類型からの検討(横井), コーンと山中式硬度計の関係(田中)が注目される。

水田の機械化で盤層は支持力を荷うが、畑地では作物根にとってその固さが障害となる。固さ(柔らかさ)とか貫入抵抗という言葉は、土壌の弾性・粘性・塑性、試験機との摩擦・付着などが複雑に総合された内容をもつ

ている。したがって試験法の実用的役割はともかく、力学的内容を明らかにするためにはレオロジーの導入が必要であり、また固体と液体の中間的性質をもつ土のような物質の力学的挙動は、それなしには充分描きえないともいえよう。

含水比表示から pF への着目（徳永）は、岩田、妹尾の整理をへて pF の工学的利用を可能にした。関東ロームの総合的なとりくみ（山崎）の中で、レオロジカルな手法は、土壌像、土-水系の状態量、強度に対する考え方を明らかにした（須藤）。締固めにおける自由化（多田）、軟化・硬化（安富）。収縮挙動のエネルギー的考察（竹中）もその中から生れた。関東ロームの土工の問題や常時微動による軟弱地盤の考察（山崎）、三相分布から支持力・流動性への解析（美園、寺沢）など今後の発展が期待される。

粘弾性は土を連続体としてとらえた概念であるが、凝集力、摩擦、付着などは粒子間の関係を問題にする。土の力学的性質をかえたい時には、粒子系の性質をしる必要がある。粒子の配向（素木）は、収縮挙動に反映（小橋）し、キレツの機構（佐藤）につながる。火山灰土壌ではミクロな構造（美園）が問題になるが、耕耘には付着の克服（藍）が必要である。粉体としての土壤に着目した固結度、連結度、圧砕度（山中、米田、国分）は、易耕性（木下）の評価などで実用的役割を果たしたが、基本的には土粒子のコロイダルな挙動、分散・凝集（川口喜多、妹尾）が重要であり、高分子添加剤の基礎を与える。改良剤を用いる火山灰農道や粘質土の処理（富士岡、長堀、荻野）、送泥客土（岸上）、火山灰地の開田（石川徳永）など農地土工で力学的挙動の研究が荷う役割は、今後ますます大きくなるであろう。

赤黄色土の物理性と有機物

湯村 義男（東海近畿農試）

土壌物理学であつかう内容は、近年ますます広く、多様になっているが、畑作物の培地として、および農作業の対象として、基本的に重要な物理性は、団粒の安定度と凝集力であると考え、主にこれらと土壤有機物との関係、および有機物施用による物理性の変化について述べ、さらに赤黄色土における若干の問題点についてふれる。

構造と土壤有機物

結合剤（Fe, Al, Si, Ca, 有機物など）の存否は土壤構造の安定度を規定する。構造単位は、一次粒子、二次粒子（微細団粒）、団粒、土塊とみなされ、土壤有機物は、これら構造単位のうち、団粒の結合剤として重要である。腐植画分のうち、結合剤として有効なのは、難溶性の腐朽物質やポリウロニドと推定され、新鮮有機物の施用が団粒化を促進する。また土壤有機物は、Fe, Alとともに二次粒子の結合に若干の寄与をしているが、非火山灰土では、この二次粒子がきわめて少ない。

コンシステンシーと土壤有機物

コンシステンシーには、土壤固有の構造と層序をこわさないで測るべき性質と、構造をこわし、一次、二次粒子の分散系として測るべき性質とがある。後者の場合には、団粒は破壊された状態になるので、二次粒子もふく

めた分散相の性質が問題になる。凝集力（固結度）は粒子間の接合部集積水の表面圧に由来するので、水和度の大きい土壤有機物が粒子表面をおおうと、土壤の凝集力は減少する。

また、赤黄色土の易耕性は、少水分段階では凝集力に、多水分段階では可塑性に大きく影響される。有機物の富化によって、塑性限界は多水分側に移行し、塑性限界における凝集力は低下する。

有機物施用による土壤の物理性の変化

多量の有機質資材を連用すれば、孔隙性、保水性、透水性、貫入抵抗、団粒、砕土、亀裂などに一定の影響があり、その影響は、施用有機物の種類にもある程度関係する。しかし、一般に物理性が不良といわれる赤黄色土でも、これら物理性の変化が作物生産に直ちに好結果をもたらしたと確認できる例は少ない。

研究上の問題点

1) 物理性と関連して土壤有機物問題を考える場合には、有機物含量と粘土含量または総比表面との関係を無視できない。

2) 赤黄色土における土壤有機物の集積に対する粘土鉱物、母岩、および耕耘の影響を明らかにすることが必要である。





土壤の物理性 第19号

(会 員 配 布)

1968年10月25日 発行

発 行 土 壤 物 理 研 究 会

東京都文京区弥生1の1の1

東京大学農学部農業地水学研究室内

電話東京 (812) 2111 内線 4590

振替口座 東京 17794