

粘質水田土の粗孔隙の実態と透水性について

— X線透写像による土壌と間隙に関する研究(Ⅱ) —

徳永光一*, 佐藤照男**
菊池 宏*, 今 和則*

On the real state of coarse pores in clayey paddy field's soil and their permeability.

— Study on the soil and its void by X-ray radiograph (Ⅱ) —

Koh-ichi TOKUNAGA*, Teruo SATO**

Hiroshi KIKUCHI*, Kazunori KON*

*Faculty of Agriculture, Iwate University

**Akita Prefectural College of Agriculture

I はしがき

本報告は、第Ⅰ報¹⁾と同じ“重液浸入法”を水田土層に適用した結果について報告する。用いた水田土は粘質土であり、重液造影剤の孔隙への浸透が第Ⅰ報と同じ方法では極めて困難であり、本報告では新たに開発した浸透法（造影剤自体は第Ⅰ報と変らない）について述べる。

また孔隙像の軟X線撮影を終えた試料土はそのまま不攪乱で透水係数を測定したが、生土不攪乱の裸体試料を透水試験にかけるためには新たな透水試験法を考案する必要を生じた。その試験法についても紹介する。

以上の結果えられた孔隙像の実態や特徴と対比しつつ測定された透水係数の異方性や水稻根による根成孔隙の意義について考察する。

なお、本研究では孔隙とは管状またはそれに近い間隙を指し、間隙とは孔隙の他に粒子間隙、亀裂など土壌中の固相以外の空間を総称するものとして用いる。

II 研究の方法

1. 採 土

採土した水田は盛岡市郊外の矢巾^{ヤハバ}不動地区（以下矢巾地区と略称）沖積水田（古田）と八郎湯水田（秋田県立

農業短大農場、水田歴10年）の2ヶ所である。いずれも粘質の排水不良田である。図-1に土壌型と土層断面およびサンプリング深度を示す。

採土は主として壺掘りにより1辺15cmぐらいの不攪乱立方体として切り出し、上面を石灰粉によりマークして持ち帰り、実験室で上下面を判別しながら、ワイヤソーにより42mm立方体に小切断した。圃場では亀裂が存在したが、採取した立方体ブロックには亀裂を含まないように注意してサンプリングした。したがって小切断の際にはほとんど亀裂は見られなかったが、発見されれば亀裂を避けて整形した。

2. サンプルの諸性質

表-1に各サンプルの物理性一覧を示した。矢巾試料では下層ほど砂分が減りシルトが増えているが土性はいずれも粘質ロームである。その他の諸量も沖積水田としては、ごく標準的な値を示している。

八郎湯試料は未分解有機物に富むので粒度分析に際しH₂O₂処理を行い、また分散も不良なのでU. S. 処理を施した後珪酸ソーダ添加を行った。粒度組成は矢巾にくらべて粘土含量が30%以上多く、土性は各深度とも重粘土である。圃場水分は130%以上で矢巾の3倍以上、逆に乾燥密度 ρ_d は平均0.6 gr/cm³以下で矢巾の $\frac{1}{2}$ 以下と対照的である。この相違は八郎湯試料が有機物に富むだけで

* 岩手大学農学部

**秋田県立農業短期大学

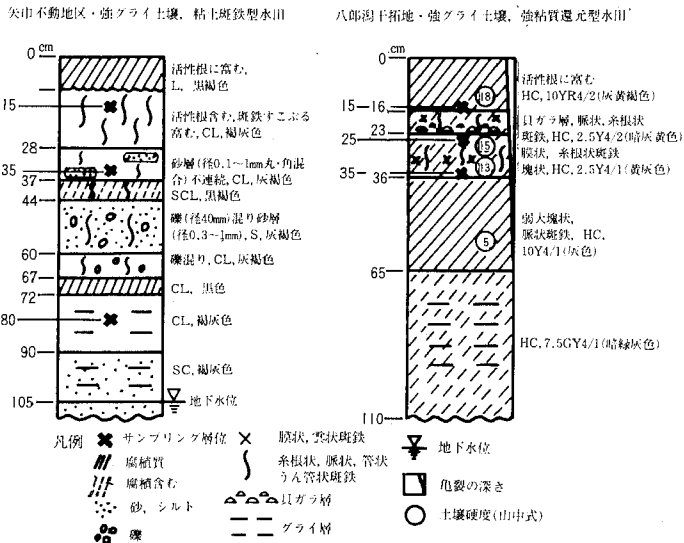


図-1 採土地点の土壌断面

表-1 試料土の物理性

深 度 (cm)	矢 巾			八 郎 潟			
	15	35	80	15	25	35	
土 性*	CL	CL	CL	HC	HC	HC	
粒 度*	砂	63	58	46	19	11	16
	シルト	21	23	36	29	34	34
	粘 土	16	19	18	52	55	50
液性限界 W_L (%)	41.73	41.65	47.66	131.78	201.88	186.08	
塑性限界 W_P (%)	23.15	22.31	24.36	57.54	84.53	72.73	
塑性指数 I_P	18.58	19.34	23.30	74.24	117.35	113.35	
圃場含水比 W_f (%)	30.82	31.50	53.76	124.94	139.45	145.39	
乾燥密度 ρ_d ($\frac{g}{cm^3}$)	1.488	1.568	1.258	0.615	0.573	0.581	
真比重 G_s ($\frac{g}{cm^3}$)	2.670	2.678	2.637	2.629	2.541	2.563	
間隙率 n (%)	44.27	47.45	52.29	76.61	77.45	77.33	

* 国際土壌学会区分による

なく粘土鉱物が膨張性2:1型スメクタイトであることによるものと思われる。八郎潟の ρ_d が低いことは、X線吸収が少なく相対的に撮影しやすい利点を生じた。

3. 造影剤の浸入法

第I報では試料土の上面から造影剤を降下浸透させるか、造影剤に下面を浸して毛管上昇させるかなどの方法を行った。これらは重力と毛管力によるものであるから、“重力・毛管力法”と呼ぶことにする。

しかし本研究の対象土はすべて粘質土であり重力・毛管方法では造影剤の浸入がきわめて困難であった。一方、水田土であるから上下方向には直径の大きい根穴が存在するが、このような大孔隙は造影剤が浸入しやすけれども、下端から脱落してしまい孔隙を充填できず、

孔隙造影が不良となった。そこで酸化鉄粉末 (Fe_3O_4 , Fe_2O_3 など) を造影剤として用いる方法など2~3の試みを行ったが成功せず、最終的に次の方法で良好な結果をえた。

まず試料土を水で飽和し、底面にベントナイトペーストを全面に塗る。上面は4周を巾3mm程度残し、その内部を浅く削ってここに造影剤(ジヨード・メタン)を湛液する。上面と同じ正方形(42mm角)のプラスチック板で蓋をする。蓋の中央に針穴をあけて試料土を放置乾燥させる。側面4周から水分が蒸発すると共に上面に湛えた造影剤が孔隙に浸入してゆく。周面に到達した造影剤は外壁に灰白色の光沢にじみとなって漏出するのでベントナイト・ペーストをコテ塗りして抑える。軟X線透視

表-2 軟X線撮影条件 (試料別)

試料土	矢巾(粘質ローム)			八郎 濁(重粘土)		
	15cm	35cm	80cm	15cm	25cm	35cm
露出時間 (sec)	96	96	84	40	40	40

撮影機種, CMB-3

表-3 軟X線撮影条件 (試料共通)

管電圧 (KVp)	管電流 (mA)	試料土厚 (mm)	焦点・フィルム 距離間 (F.F.D.) (cm)	フィルム 種類	増感紙
60	3	42	50	フジHS	鉛 箔 0.03mm バックのみ

撮影機種, CMB-3

装置により浸入状況を確認しながら、適当と思われる時点まで乾燥による浸剤を続ける。今回の試料ではこの浸剤に24~48時間を要した。ただし夜間はラップ・フィルムなどで梱包し、乾燥を中止した。

この結果、粗大孔隙も微細孔隙も共に造影剤の浸入が良好となった。この浸剤法を“乾燥法”と呼ぶことにする。重力・毛管力法に比べて乾燥法は時間を要するが、前者では大孔隙の造影剤脱落を生ずるなどの欠点があるが、後者ではそれがない。また重力・毛管力法では浸剤の困難な不透水性試料に対して乾燥法は必須の浸剤法となる。

4. 軟X線撮影法

使用した軟X線装置は第I報と同様であるが、土壌が異質であり試料土厚さも倍増したため撮影条件は第I報に比べてフィルムの種類を始めかなり異った。表-2, 3に実行された撮影条件を一括して示した。

軟X線照射は図-2に示すとおり、各試料ともX,Y

を出張先で行うため時間的制約から今回はZ面撮影を省略した。

また造影剤を浸入させないで撮影(無剤撮影と呼ぶ)した結果は、八郎濁試料では斑鉄が明瞭に写し出された。管状と糸根状(根穴に酸化鉄沈積が充満しているものを指す)あるいは暈管状の斑鉄の区別も明らかであった。矢巾試料では ρ_d が1.5 (gr/cm³)級と大きいためか斑鉄の影像是薄く明瞭さを欠いていた。今後、無剤撮影は斑鉄その他金属の沈積などを形態的に究明する手法として研究の余地が十分にある。画像処理装置を軟X線透視装置と連動させることにより薄いコントラストを鮮明化することは既に常用の手法になっている。したがって軟X線透写法は有力な武器になると考えられる。

5. 透水試験法

試料土の孔隙造影フィルムを撮り終った後、造影剤を気散させ、透水試験と粗孔隙量の測定を行った。これらの試験を行った理由は試料土の孔隙影像に明らかな異方分布を認めたからである。

軟X線撮影後も試料土は生土の不攪乱状態を維持しているため、同一試料についてさらに別個の測定を重ねることができる。この点が顕微鏡撮影などに比べて“重液浸入法”の有利な点である。

撮影後試料土に含まれる造影剤は気散により除去する必要がある。気散は試料土底面のベントナイトを除去して、水柱-10cm程度の負圧砂面上に試料土をのせ、3~4日ほど放置することで目的を達した。試料土も湿润状態が維持される。

透水試験を行うに当っては、試料土が42mm立方体の不攪乱“裸体”であるから種々工夫を要した。図-3に示すとおり、試料側面4周に繰り返した粘土板を密着張りつけする。粘土板は厚さ1~2mmで、無機質青粘土、粘

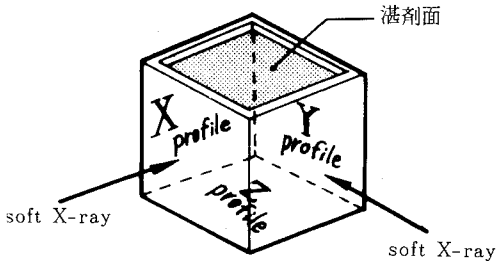


図-2 試料土に対する軟X線の照射方向

の2面について行い、それぞれの撮影を行った。Z面撮影も可能だが、造影剤の除去などの手間を要する。撮影

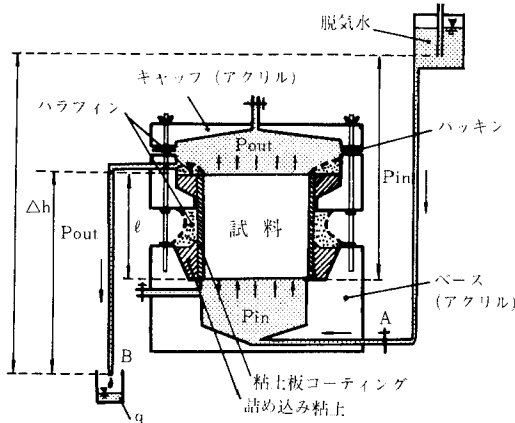


図-3 透水試験器

土含量40%程度の軽粘土，練り返した状態での透水係数は 1.81×10^{-9} cm/sであった。粘土板コーティングを終えた試料は上，下端面の全面を薄くハツリ，不攪乱構造面を露出させてから，透水試験器にセットする。ベースとキャップの試料嵌めこみ部はコーティング粘土と同じものをよく詰め込んで密着させる。さらに図-3に示すようにパラフィン上塗りを行う。

4周の粘土板は通常の透水試験器における不透水性円筒に相当し，パラフィン粘土板からの蒸発防止および粘土板周面に対する機械的強度増の役割を果す。当初の予備試験の段階では粘土張りを行わず，パラフィン・コーティングのみで透水試験を行ったが，パラフィンと試料土の密着が悪く，試料外周とパラフィンの間の通水を断ちえなかった。粘土板は密着が良好でこの欠陥は除去された。

しかし試料土の透水係数が 10^{-6} cm/s以下になると試料下面にかける水圧 (P_{in}) を大にしなければならないが， P_{in} が+10数cmを越えるとパラフィン下部が水圧のため膨張変形し漏水を生ずる。そこで試料上面にかける水圧 (P_{out}) を20~30cmの負圧とし， P_{in} は+10cm程度にとどめた。これにより動水勾配を10ぐらいまで高めることができ，透水係数 (K) の小さい土も安定して測定できた。

なお試料の飽和は透水試験直前，ベースとキャップ内の大気を-100cm水柱程度に減圧し，これを維持して平衡に達したら，ベース側を満水し， P_{in} をかけたまま，キャップ内に満水を生ずるまで放置して行く。飽和が終れば直ちにキャップ内を満水して P_{out} を負圧にして透水量観測に移る。試験に用いる水はすべて脱気水とし

た。また試験は気温21.5℃の恒温室内で行われた。

P_{out} に30cm弱の負圧を作用させる場合，試料の収縮脱水を生じないか，それによる孔隙や通路径路の変形を懸念して，次のようなテストを行った。すなわち透水量観測直前にベース側のコックAを閉じて排水口Bからの脱水量を観測したが， $P_{out} = -31$ cmにおける脱水量は始めの1時間で0.14cm³，次の3時間で0.04cm³，後続の92時間では0.0cm³，合計して試料体積の0.34%と微少であった。したがって負圧負荷方式による透水試験中の収縮脱水現象は発生しないものと考えた。

Kの測定法は以上のとおりに行ったが，本研究におけるK測定の目的は孔隙影像に対応した異方性のチェックにある。そこで同一試料について鉛直方向の透水係数 K_V の測定が終了すれば，粘土板コーティングの一部を剥離し，上，下面に粘土張りを施し，水平方向の透水係数 K_H を測定した。水平方向は互に直角な X, Y の2面がある。両面のうち写真1~8に示した影像面に平行な水平方向について K_H を測定した。孔隙分布の実態と K_H の対応を検討しやすくするためである。このようにKの測定はX線撮影後の同一試料につき K_V と K_H を観測した。

6. 粗孔隙量と根体積の測定

透水試験を終えた試料は砂柱法とガラス・フィルター吸引法により-15，-30，-60cm（水柱）までの pF-水分曲線を測定した。これを行った試料は-15cm深度のもので，他の試料は飽和状態から-30cmでの脱水量のみを測定した。これらにより粗孔隙量を判定した。この測定を行ったのは孔隙影像やその中に含まれる根系遺体との対比を行うためである。

ここでは本研究の標題および本文中で用いる粗孔隙などの名称とその直径については表-4のように定めて，これによった。毛管，非毛管の境界は通常に用いられる範囲から pF 1.5（相当径0.1mm）をとってあるが，“粗孔隙”の名称については今回の孔隙影造の大部分が含まれる直径を考え，50 μm以上に用いた。“大孔隙”の名称も同様に影像の実態から鉛直孔隙の太いものを該当させるように500 μm以上に対して用いることとした。

前述の脱水量測定により粗孔隙量の観測が終ると，試料を水中で静かにほぐし*，水ふるい（74 μm以上の各種）によって根遺体をできる限り拾い出し，ピクノメータ法により根体積を測定した。根遺体はいずれも断片状であり，茶褐色化していたが，八郎湯試料には微細な遺体が多量に認められた。

*) 透写像写真に現われた砂塊や要チェックの影像の実体は，この解体作業時に写真中の位置と対比しつつ調べておく。

表-4 本文で用いる孔隙名と直径など

	大孔隙		粗孔隙		微細孔隙
	非毛管孔隙		毛管孔隙		
直径 (mm)	1	0.5	0.1	0.05	0.01
負圧(H ₂ O)			30	60	300
pF			1.5	1.8	2.5

III 結果と考察

1. 孔隙影像について

撮影結果を写真1~8に示す。X線原板フィルム影像は42mm角正方形に、その引伸・焼付プリントも拡大正方形に写るが、掲載写真は紙面の都合で上、下をカットしてある。左右巾は原板像全巾にほぼ等しい。すべての写真上辺のさらに上方に湛剖面があり、その位置が試料土の上面である。ただし写真7は写真上辺に湛剖面を入れてある。この試料は後述の目的から試料の側面（採取土層における鉛直面を90°倒して水平面とし、湛剤を行った撮影である。またX,Y両面の写真を掲載したのは深度15cmのみで他はいずれか1面のみに割愛した。

全写真を通覧すると、上下左右に走る多数の黒筋、黒帯が見られる。これは間隙に浸入した造影剤の影であり、間隙の形が現われている。写真1,2あるいは写真5,6のX面とY面の影像を比べるといずれも黒筋の集合である。両面は同一孔隙群を互に直角な2方向から投影した影像であるから、そのいずれもが筋状に現われたことは、間隙の形態がほぼ等直径の管状孔隙であることを示している。さらに影像の疎な部分を観察すると、鉛直方向の筋のところどころより一段細い筋がほぼ直角に分岐しているのが見られる。また鉛直方向の筋は太く、水平方向の筋は細い。これらの影像の特徴と試料土採取位置が水田の-15cmという事実から考えて、黒筋群は水稻根の根穴孔隙であると判断できる。

鉛直方向の太い孔隙は冠根（1次根）により、水平方向の細い孔隙は2次根以下の側根により形成された“根成孔隙”ということになるが、土壤中における根穴の保全と発達にはまことに良好、精細であることが見てとれる。とくに八郎潟試料では想像を越える細根（毛管孔隙）の発達ぶりと云えよう。

深度15cm以下の写真については透写像の1面を割愛したが、両面をくらべて黒筋群は15cmと同様に、すべて管状孔隙群であると確認された。また孔隙像の形態的特徴もすべて15cmに類似しており、水稻根による根成孔隙と判断される。ただし写真3,4の鉛直方向に見られるミリ級直径の孔隙は水稻根でないかも知れない。深度80cm

の写真4では孔隙も疎となっており、水稻根群域の下端であることを窺わせるが、それでも細根による毛管孔隙の蓄積は試料の全面に及んでいる。

また全写真を通じて孔隙が根成であるため鉛直、水平方向とも1孔隙の太さはほぼ一様で、カーブはゆるやかなものが多い。大孔隙はほぼ直線的に走り、細根孔隙は下層土ほど屈曲が多くなる。

根成孔隙のほか写真に現われた影像として黒雲状の影が見られる。写真3,4,7,8などにそれがある。この黒雲は砂塊の部分である。無刺撮影フィルムでは粒状影として砂塊は判別できるが、それと同位置に上記の黒雲が現われている。撮影後の試料土解体の際にも同位置に砂塊の存在を確認した。浸剤過程で乾燥脱水が進むと砂の粗孔隙には浸剤が早く始まるので、毛管孔隙とはほぼ同時に造影されてくるのが透視により観察された。

砂塊のほか写真3の矢の影は試料解体により黒色の炭化物破片であることが分った。水に浮き木炭のような筋状節理が発達しており指先で容易に潰れた。古い植物枝茎の炭化物と思われた。新しい水稻根遺体がこの破片を貫通している部分も見られ、造影剤が孔隙を通じてこの炭化物に浸みこみ造影されたものである。写真3には矢の他に3個の同種像が左上に見られる。

写真2の矢の煙状像は試料外周に漏出した造影剤の拭き取り不十分による造影ミスである。

次に矢巾と八郎潟を比較する。矢巾は鉛直方向の大孔隙の本数が多いが、径はより細い。水平方向の毛管孔隙は八郎潟の方が遙に数が多い。これは矢巾試料は砂含量が高いため、乾燥浸剤を強く行くと黒雲影が大きく拡がりやすいため、十分に毛管孔隙の造影を行えなかったことが原因の一つである。しかし基本的には毛管孔隙量が八郎潟の方が多きことによる。深度15cm試料のpF 1.5~1.8の毛管孔隙量は八郎潟が2.06%（容積率）、矢巾が1.08で2倍の差がある。したがって八郎潟の水平方向毛管孔隙の発達が発達した矢巾のそれより著しいことは明らかであり、写真にはこの傾向が強調されて現われていると見られる。

しかし鉛直方向大孔隙像は試料土中の実在量を忠実に反映していると考えられる。浸剤過程における透視観察では造影剤の浸入は大孔隙から始った（写真7は除く）。その後次第に毛管孔隙へと進むことが明らかであったので、掲載写真撮影の段階では実在大孔隙はすべて浸剤を終了していると判断されるのである。

したがって矢巾の鉛直大孔隙群は八郎潟に比べて細く、数が多いことは写真に示されたとおりに受けとれる。冠根の形成した鉛直孔隙が細く、2次根以下による水平方向毛管孔隙の数が少ないという矢巾水田は八郎潟水田に比べて、水稻根の生育が不良であり、作柄もこれに

表一五 孔隙影像の垂直方向と水平方向の直径と本数
(試料断面積: 17.64cm², V: 垂直方向, H: 水平方向)

孔隙直径 (μm)	矢 巾						八 郎 湯					
	15cm		35cm		80cm		15cm		25cm		35cm	
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
0~49		4		1				28		5		8
50~99		18		12		31		56		31		65
100~149		3	7	12	3	7	2	18		21		21
150~199	6	1	6	1		2		7		2		1
200~249	4		3	1				2	1	3		2
250~299	5	1	3		1		1	1	5	1	4	
300~349	6								1	1	1	
350~399	7		3				5		2		1	
400~449	1						2		2		3	
450~499	1		2						1		2	
500~549	2										2	
550~599	1								4		2	
600~649							1		1		2	
650~699			1						1			
700~749												
750~799							1					
本 数 計	33	27	25	27	4	40	12	112	18	64	17	97
平均直径	300	60	280	90	160	90	370	60	420	90	440	90

応じたものであることが推定される²⁾。

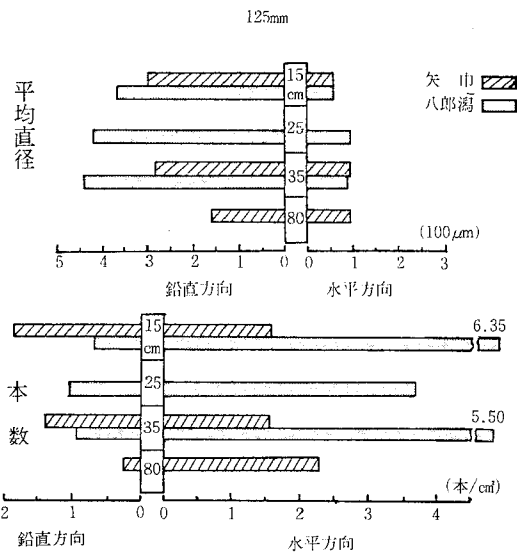
表一五には写真1~8の原板フィルム像を40倍に映射し、孔隙直径や本数を計測した結果を示す。鉛直方向孔隙は試料上面から下面まで貫通するもののみを計測した。水平方向孔隙は径が小さく多数のうえ、径路も入り組んでいるので、試料横巾の中央を通る鉛直ベルト(スクリーン上で24cm巾)を横断する孔隙を紙上にトレースして計測した。表一五に示す平均直径は各直径本数の加重平均である。図一四に孔隙本数を試料断面1cm²当りに換算したものと平均直径を図示した。35cmまでの孔隙について見れば、

鉛直方向 直径300~450 μm , 1~1.5本/cm²

水平方向 直径 60~90 μm , 2~5本/cm²

と概括される。水平方向の本数を矢巾について図一四の値からのみ平均化すれば1.5となるが、前記した毛管孔隙量を考慮に入れて2と見積っている。

写真7の孔隙像は前述したように試料の水平方向に浸剤を行ってえられたものである。その目的は毛管孔隙が湛剤面から遠隔の写真下端に横たわる大孔隙まで接続しているか、その連続性を造影剤の浸入によって確かめようとしたものである。写真7は下部がカットされているが、原板では下端の大孔隙まで完全な造影が行われている。試料寸法が42mmに過ぎないから、側方毛管を形成した2次根以下の細根は試料下端から湛剤面まで伸長範囲



図一四 孔隙影像の平均直径と本数

に入り、写真の結果は当然とも思われる。しかしこれにより他の写真とは逆コースの浸透径路もまた良好な連続性を有することが分る。

以上、影像からえられた粗孔隙分布の特徴をまとめると次のようになる。

- ① 水稻根による根成孔隙の分布が支配的であり、深度35cm以上では濃密、精細な分布をしている。
- ② 鉛直方向に大孔隙、水平方向に毛管孔隙が走るといふ孔径の大小分布に明らかな異方性があり、透水性への影響が推察される。
- ③ 造影剤の浸入状況から見て、鉛直、水平両孔隙群の接続性は良好である。
- ④ 孔隙の影像外形は径の広狭、屈曲が少い円孔の管路網と見られる。
- ⑤ 粗孔隙としては根成孔隙の他に局所的な砂塊の間隙が見られる程度であった。

以上のような特徴は水稻根系の特性に原因するものであるから、水田の土層条件や水稻根の生育、生態によりさらに変動を生ずるであろう。例えば探土深を15cmより浅くとれば冠根が45°方向や水平方向に伸長するから、孔隙網の特徴は大巾に変化するはずである。

2. 試料土中の根体量

試料から洗い出した根体の太さは径0.1mm以上のものが目立った。また毛管、非毛管孔隙の境界を一応0.1mmとしたことなどにより pF1.5 間隙率を測定し、これに対する根体積率を算出した。表一六に結果を示す。

矢巾では8%以下、八郎潟ではかなり多く20%以下の根遺体がある。前者では非毛管孔隙の大部分が空洞であり、ごく一部に根体が残っていると考えられる。後者では非毛管孔隙の約半を根体が占めていることになる。しかし八郎潟試料では根体も微細なものが多かったため、50 μ m以上の全粗孔隙量(4%強)に対する根体積率に算出しなおせば、約半の10~8%程度となる。

以上のことから写真1~8の孔隙像はおよそ空洞となっている物理的間隙と見なすことができる。

3. 透水係数の異方性

表一七に測定した透水係数一覧を示す。これらの値は前述のように写真1~8の試料そのものについて測定した結果であり、写真に示された孔隙分布の異方性がよく反映されている。各試料の K_V/K_H は矢巾80cmを除き数十倍~数百倍の比率を示した。

K_V 値の中で八郎潟35cmがやや大きい値を示している

表一六 試料土中の根体片の体質

採土地点	層深	間隙率 (%)	A に対する根体積率 (%)	
			pF1.5 間隙率 A (%)	A に対する根体積率 (%)
矢巾	15(cm)	44.27	2.49	7.81
	35(cm)	41.45	2.39	3.43
	80(cm)	52.29	1.38	2.35
八郎潟	15(cm)	76.61	2.11	19.46
	35(cm)	77.33	2.45	16.54

が、これは鉛直大孔隙が他よりも太いためと見られる。また K_H 値の中では矢巾も八郎潟も35cmが他に比べて大きい。この理由はいずれの試料も写真下辺部に横たわる砂塊の影響と見られる。掲載していない Y,X 面と対比すると、これら下端部砂塊はほぼ一直線状に連らなっていることが分る。したがって水径として有効な層をなし K_H を増大させていると判断した。

また矢巾80cmは K_V/K_H が1.1で等方的である。これは写真4に見るとおり、鉛直方向大孔隙が2本と少ないうえ、いずれも下方で途絶し下端まで貫通していないため、 K_V が 2×10^{-7} cm/s まで低下したものと見られる。写真には横方向の砂層が上辺に沿って分布するが、これは直角方向から見て、まとまりのない連続性に欠けた分布をしているので K_H を高める効果が少ないと考えられた。

以上のように粗孔隙分布の実態は表一七のK値をかなりの程度に説明しうるが、以下に孔隙像の実態にPoiseuille式を適用して透水係数の計算値 K_C を算出してみる。 K_C と実測の K_V や K_H を比べる。孔隙像の直径や本数のデータを示した表一五に基づき、動水勾配を1.0としてPoiseuille式から計算した K_C を表一八に示す。 K_C の算出は孔隙計測精度の高い鉛直方向大孔隙の K_V を主たる対象とした。 K_H については矢巾80cmが水平方向毛管孔隙の計測精度が良かったので、これについて K_C を算出した。

表一八の計算値と実測値を比較すると、矢巾80cmを除き両者の比は2~7倍で計算値の方が大きい。K値としてはオーダー以内の精度で一致しているが、いずれも計

表一七 試料土の飽和透水係数の測定結果

地点	矢巾			八郎潟		
	K_V (cm/sec)	K_H (cm/sec)	K_V/K_H	K_V (cm/sec)	K_H (cm/sec)	K_V/K_H
15(cm)	1.49×10^{-4}	3.04×10^{-7}	490.1	1.81×10^{-4}	5.41×10^{-7}	334.6
35(cm)	2.76×10^{-4}	5.71×10^{-6}	48.3	7.30×10^{-4}	8.66×10^{-7}	843.0
80(cm)	2.01×10^{-7}	1.87×10^{-7}	1.1	—	—	—

注) K_H の透水方向は写真面平行方向である。15cmについては、写真2, 6面に平行方向で測定した。

表-8 透水係数の計算値(K_c)と実測値(K_m)の比較

試料	計算透水係数 K_c (cm/sec)	実測透水係数 K_m (cm/sec)	K_c/K_m	
矢	15cm K_v	8.26×10^{-4}	1.49×10^{-4}	5.54
	35cm K_v	5.57×10^{-4}	2.76×10^{-4}	2.02
巾	80cm K_H	6.34×10^{-6}	1.87×10^{-7}	33.90
八郎湯	15cm K_v	9.50×10^{-4}	1.81×10^{-4}	5.28
	35cm K_v	5.11×10^{-3}	7.30×10^{-4}	7.00

算値が大きく出た原因として次のようなことが考えられる。① Poiseuille 式的前提である管路の直線性や断面の真円性について実態は相違がある。②表-6に示したとおり根系遺体が孔隙中に残存し、その局部については有効通水断面の直径が孔隙影像に現われる外径より小さい。③孔隙内壁に沈積した酸化鉄などの斑鉄も②と同様な影響を与える。(根系遺体や斑鉄は造影剤の浸潤により、孔隙中心部と同様に黒化して撮影される。活性根は造影剤に浸しても根体内に浸潤を生じない。)

矢巾80cmの K_H については K_c が実測値 K_m の34倍と一段に大きい。その理由は上記した①、②によるものと思われるが、とくに写真4を観察すれば毛管孔隙の屈曲や分岐が多く、管路内損失と管路長(有効流路長)の増大により K_c/K_m が特に大きくなったものと思われる。

以上のことから定量的に見ても、 K_v と孔隙影像の実態とは Poiseuille 式により、かなり良好な(10倍以内)アプローチの得られることが分った。しかし K_H については毛管孔隙の実態に合せた理論式の検討が必要になると云えよう。水田土の K の異方性については、すでに横井ら³⁾、増島⁴⁾などにより知られているところであるが、ここでは新しい手法により再検討を試みた。

4. 透水性増大に及ぼす根成孔隙の意義

写真に示した根成孔隙像のうち、鉛直大孔隙はその K_v を K_H と比べることにより透水性増大に果す役割の大きいことは明らかである。

しかし2次根以下の水稻根により形成された水平方向の毛管孔隙は精細、濃密な分布を示すにもかかわらず、

10^{-7} cm/s級の K_H であり、土壤の透水係数としては通常“不透水性”に分類されるオーダであった。これらの毛管孔隙群の存在は粘質水田土の透水性に対し、どの程度の貢献をしているのであろうか。

この点を明らかにする目安として、 K_H を測定した各試料を攪乱し、練り返した状態で K を測定した。練り返しにより毛管孔隙を消滅させ、その状態での透水係数 K_R を測り、 K_H と比べれば、毛管孔隙の透水性への寄与が推定できると考えた。 K_R 測定に用いた試料は K_H 測定試料と同深度であるが同時採取の別個体である。 ρ_d や Wf は K_H 試料としてできるだけ同一にした。 K_R 測定は練り返し後アクリル円筒に充填し通常の変水位法で行った。結果を表-9に示す。

K_H に対し K_R は明らかに低下している。 K_R が自然堆積状態で根成孔隙が皆無の場合の K と全く同一であるかどうか、今回の実験の範囲では十分な判断は困難である。練り返しによる粘土の配向や吸着水層などの変化が K_R の低下の一因をなしているかも知れないが、ここではそれらの影響を無視しておく。また、35cm深の K_H は砂塊の透水性が影響していることはすでに見た。したがってこの層位の K_R 低下には砂塊水径の消滅による効果も含まれている。そこで毛管孔隙の透水性については砂塊の影響がない15cm、80cm深の K_R と K_H の対比によって判断する。両層における K_H/K_R は3.1~15.4倍の値を示している。この値は前述した粘土粒子に対する練り返しの影響を無視すれば、毛管孔隙が透水性増大に対し少なからざる貢献をしていることを物語るといえよう。

IV ま と め

(1) 粘質ローム(矢巾地区)と重粘土(八郎湯)の強グライ土壤水田から15, 25, 35, 80cm深の土壤を不攪乱採取した。この試料につき“重液浸没法”により粗孔隙(径50 μ m以上)の軟X線透写像を撮影した。

(2) 造影剤の浸没法を改善し、新たに“乾燥法”を考案した。これにより孔隙造影法は著しく改良された。

(3) 円筒に入っていない裸体不攪乱土に対する透水試験法を考案した。これにより重液浸没法による撮影が終

表-9 練り返し土の透水係数(K_R)と不攪乱土の透水土数(K_H)の測定結果

地点	矢 巾			八 郎 湯		
	K_H (cm/sec)	K_R (cm/sec)	K_H/K_R	K_H (cm/sec)	K_R (cm/sec)	K_H/K_R
15(cm)	3.04×10^{-7}	5.46×10^{-8}	5.57	5.41×10^{-7}	3.52×10^{-8}	15.4
80(cm)	1.87×10^{-7}	6.00×10^{-8}	3.12	—	—	—

註) K_H は表-7より引用

った試料土の透水係数を測った。同一試料につき鉛直方向と水平方向の透水係数 (K_V と K_H) を測定した。

(4) 孔隙影像是写真に示すとおり、水稻根による根成孔隙の発達が著しかった。鉛直孔隙は最大径0.7~0.8mm, 平均0.4mmぐらい, 分布密度は1~1.5本/cm², 水平孔隙は径がほぼ均一で60~90 μ mぐらい, 分布密度は2~5本/cm²であった。鉛直方向の孔隙は太く, 水平方向のそれは細いという根成孔隙の特性による異性が明瞭であった。

(5) 試料土中の根系遺体は矢巾地区が非毛管孔隙(径100 μ m以上)量の2.4~7.8%, 八郎湯が同じく16.5~19.5%含有されていた。孔隙影像の大部分は空洞と考えられた。

(6) 実測透水係数(飽和)は孔隙像の分布状況によく対応し, 35cm以浅は K_V/K_H 比が数十ないし数百倍の値を示した。Poiseuille式を孔隙像の実態に適用して透水係数を求めた場合, 鉛直方向については10倍以内の精度で実測 K_V 値に一致した。水平方向については同式は不適であった。

(7) 実測 K_H は 10^{-7} cm/s 級の値であったが, 試料土を繰り返して測定した透水係数 K_R はさらに小さく K_H/K_R 比は3.1~15.4倍であった。このことは根成毛管孔隙(径50~100 μ m)も粘質水田土の透水性増大に貢献していると思われた。実測 K_V は35cm以浅の試料では 10^{-4} cm/s 級の値を示し, これは冠根による根成非毛管孔隙の貢献により大巾な透水性増大がもたらされていることを物語っている。

【謝 辞】本研究の遂行に当り, 軟X線を「ミミズ体内の団粒形成過程の研究」(1980年)に使用された岩手大学土地改良学講座石川武男教授や同大農地造成研究会には種々御支援を頂いた。また掲載写真の引伸・焼付については上記講座の向井田善朗技官の手を煩わした。

透水試験器の設計, 製作については別テーマの研究を遂行中の宮城県立農業短大, 佐々木長市教官と共同で作業を行った。また, 本研究遂行過程では岩手大学農学部修士課程在学中の成岡市君の協力もえた。

軟X線撮影については第I報に引きつづき, ソフテックス社映像研究所の御好意を頂いた。

試料採取に当っては岩手県盛岡南部土地改良事業所の永井毅所長以下, 関係スタッフにお世話になった。

これらの方々に誌上を借り, 深甚な謝意を表する次第である。

引用文献

- 1) 徳永光一, 成岡市, 深谷高俊: 重液浸入法の開発とそれによる土壌間隙の軟X線透写像についての考察—X線透写像による土壌と間隙に関する研究(I), 農土論集, 114, 61~68 (1984)
- 2) 片野学: 多収穫田と稲の根, 岩手大学農学部, 昭和58年度営農技術公開講座テキスト, 56~67 (1983)
- 3) 横井肇ほか: 土壌の透水係数の方向性について, 土肥誌, 40, 271~275 (1969)
- 4) 増島博: 水田下層土における飽和透水係数の異质性, 土肥誌, 41, 119~120 (1970)

(1985. 3. 6 受理)

Summary

(1) The real state of coarse pores (the diameter $> 50 \mu\text{m}$) in the sample soils was radiographed by soft X-ray with "Heavy Liquid Infiltration Method". The sample soils were prepared by undisturbed sampling from clayey paddy field. The sampling depths were 15cm, 25cm, 35cm and 80cm.

(2) The infiltrating method of heavy liquid (contrast medium) to sample soils was improved exceedingly and that was named "Drying method".

(3) A permeability testing method was designed for bare (uncontained in cylinder) undisturbed sample and by this method the coefficient of permeability was measured for the sample which had been radiographed by H. L. I. method and Drying method. After the coefficient of permeability in vertical direction (K_V) was measured, the horizontal permeability (K_H) was measured for the same sample.

(4) The soft X-ray radiographs of soil pores showed exceeding development of root pores formed by rice. Vertical pores had 0.7~0.8mm diameters in maximum size or 0.4mm diameter in mean size and pores number per cm² was 1~1.5. Horizontal pores had nearly uniform diameter of 60~90 μ m and pores number per cm² was 2~5.

The anisotropic characteristics of pores distribution that had large diameter in vertical direction and small diameter in horizontal direction was very clear. It seemed that this characteristics induces the anisotropic permeability.

(5) The root bodies pieces found in Yahaba samples were 2.4~7.8% to the volume of noncapillary pores and that found in Hachirogata samples were 16.5~19.5% to the same. Then the pores in radiographs seemed almostly blank pores. Noncapillary pore was defined as a pores having over 100 μm diameter in this report.

(6) The coefficient of permeability corresponded with the direction of pores distribution and K_V/K_H ratio for the samples having less depth of 35cm showed a few hundred.

The calculated values of permeability coefficients with Poiseuille formula for the vertical pores distribution approached nearly to measured K_V values.

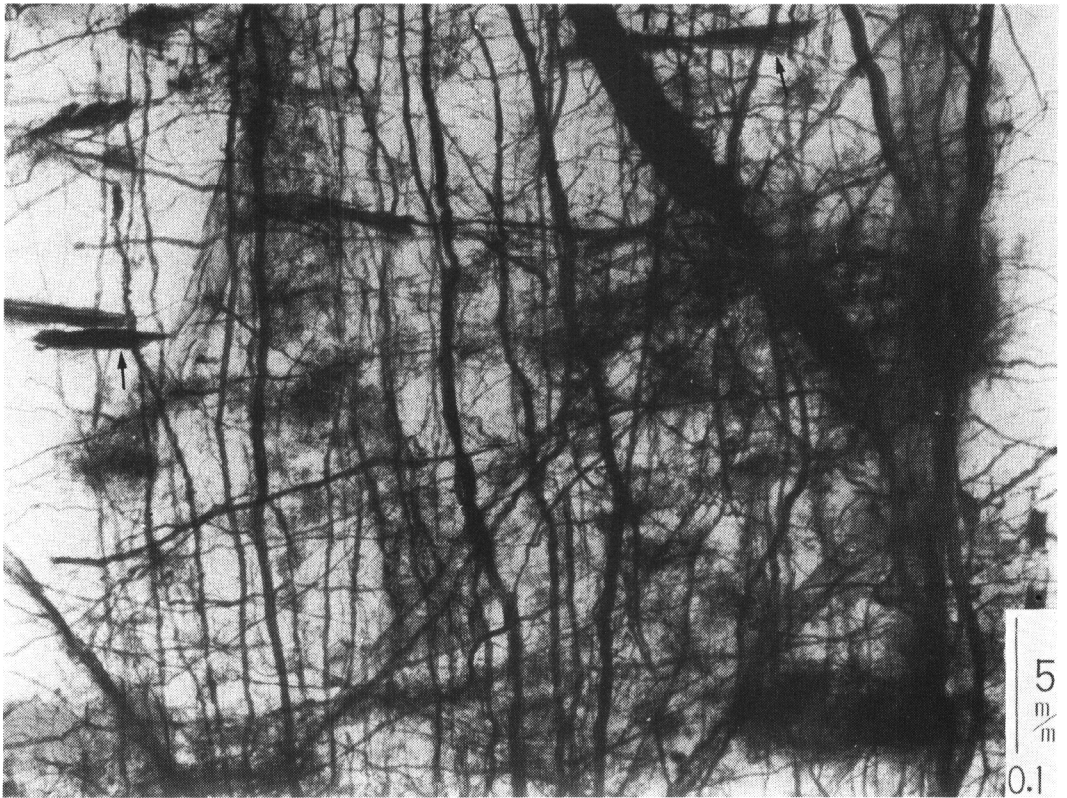
But the Poiseuille formula was unsuitable for the horizontal pores distribution.

(7) Measured K_V values for the samples having less depth of 35cm were 10^{-4} cm/s class. This values means that the permeability of clayey soil was improved by root formed pores.



▲写真1 -15cm(X面) 矢巾 ▼写真2 -15cm(Y面)





▲ 写真3 -35cm(Y面) 矢巾 ▼ 写真4 -80cm(Y面)





▲ 写真5 -15cm(X面) 八郎潟 ▼ 写真6 -15cm(Y面)





▲写真7 -25cm(Y面) 八郎潟 ▼写真8 -35cm(X面)

