

報 文

土地利用による土壌間隙構造の差異
— 軟X線による観察を中心にして —

森 也寸志*¹・志賀 摂子*²・岩間 憲治*¹
渡邊 紹裕*¹・丸山 利輔*¹

Differences in Soil Structure with Land-use,
Observations Using Soft X-Ray

Yasushi MORI*¹, Setsuko SHIGA*², Kenji IWAMA*¹,
Tsugihiko WATANABE*¹, Toshisuke MARUYAMA*¹

*¹Fac. of Agriculture, Kyoto University

*²Taiyo Consultants Co. Ltd.

Summary

Differences in soil structure according to land-use and soil properties were examined visually using soft X-ray. Consequently, the following results were obtained.

(1) Differences in paddy field

Soil structures in plow layers were different from the subsoil. In the plow layer, unique soil structures were formed in a year after spring puddling. After puddling, pores outside the aggregates were predominant to other structures, but in the lower plow layer, vertical tubular-pores were formed gradually according to rice root penetrating. In the subsoil, tubular-pores were predominant to other structures and no structural variation was observed in the course of the year.

(2) Differences in soil type

In Andosol, the pore diameter was larger than in Gray lowland soils and Brown lowland soils because of its aggregation. In sandy loam, tubular-pore structure was rarely formed because of its single-grained structure.

(3) Soil structure in upland field compared with paddy field

The plow layer in the upland field was rich in pore structures but poor in tubular-pore structures. In the subsoil, however, tubular-pore structures were predominant as well as in the paddy field, but tubular-pores had no principal direction, which is different from the paddy field. In the upland field converted from paddy field, vertical tubular-pore structure which could be seen in the paddy field decreased in number with time as affected by drainage or drying.

Key words : Soil structure, Macropore, Soft X-ray, Paddy field soil, Upland field soil

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 19-27, 1992)

I. はじめに

土壌構造の調査法として、従来、ミクロな構造については、薄片を作成して顕微鏡等で直接観察する方法、マクロな構造については、断面の観察や団粒分析、土壌水

分特性曲線などから推定する間接的な方法が中心であった。最近、放射線透過試験法を応用した軟X線による土壌構造の観察方法が確立されつつあり、直接土壌内部の間隙構造を観察することが可能となった。ここに、軟X線とはX線のうち波長が長く、透過力の弱いX線のことであり、微細形態を有する物体の造影に適している。さらに軟X線透過像をステレオ撮影すれば、土壌内部構造を三次元的に観察することが可能である。

例えば、徳永らは造影剤にジヨードメタンを用い、お

*¹京都大学農学部

*²太陽コンサルタンツ(株)

キーワード：土壌構造，粗間隙，軟X線，水田土壌，畑地土壌

もに乾燥法¹⁾(後述)を用いた軟X線透過写真により、水田における透水性の異方性を間隙構造から説明した¹⁾。また、火山灰土層においては、根系状孔隙が発達していることを報告し²⁾、根系形態学的検討やプラント・オパール分析の結果からこれを根成孔隙であると結論した³⁾。

一方、成岡は、造影剤に高粘性の塩基性炭酸鉛(2PbCO₃・Pb(OH)₂)などを用い、それらを圧入して軟X線透過撮影を行い⁴⁾、孔隙の屈曲性や方向性などの立体計測法を開発した。また、水田耕盤層において、粗孔隙は水稻根によって形成され、その形態は水稻根の形態を反映していると判断した⁵⁾。

本研究の目的は、この軟X線を用いて土壤の間隙構造を観察し、

- ① 水田、畑地という土地利用の違いが土壤間隙構造に与える影響
 - ② 土壤の種類と土壤間隙構造
 - ③ 土壤間隙構造の経時変化
- を明らかにすることにある。

なお、ここで用いる「孔隙」とは管状またはそれに近い間隙を指し、「間隙」とは孔隙を含む固相以外の部分を指すものとする。また、間隙は「土粒子が作る骨格構造の隙間」とし、骨格構造を陽とするならば、間隙構造は陰と捉えられる。しかしながら、本実験においては造影剤を用いて間隙構造を逆に陽と捉えているため、文章表現も全てそれに従った。すなわち、「孔隙の太さ」、「鉛直方向に伸びた孔隙」等の表現を採用した。

さらに本文中、「団粒」とは土壤粒子の結合状態からみた、土壤粒子がいくつか集まって作った粒団を指し、「ベッド」とは土壤の割れ方からみた、壊れやすい面により互いに分けられた比較的永続性のある集合体を指すものとする。すなわち、団粒は強度に発達したベッドと考える。

II. 供試土壌と実験方法

2.1 供試土壌

本研究においては、以下の3種類の土壌を用いた。土層断面と採土位置を図-1に示す。

(1) 灰色低地土

この試料は、滋賀県立短期大学農業部付属農場(滋賀県草津市)の水田及び畑地で採土したものである。ここは中世から水田として利用されてきたと言われており、24年前からその一部を畑地として利用してきた所で、主に牧草が栽培されてきた。土壌は灰色低地土で、灰色低地水田土壌地下グライ型にあたると思われる。採土は1990年4月26日に行った。なお、水田は代かき前であった。

水田の断面では、深さ約30cmに土色境界が観察され、すき床層は見られなかった。また、少なくとも70cmまでは地下水の湧出は見られなかった。土色はマンセル表色系で上層(0~30cm)2.5Y 3/2(黒褐)、下層(30~60cm)10YR 2/3(黒褐)であった。一方、畑地では、深さ約20cmで土色が10YR 3/2(黒褐)から10YR 4/1(褐灰)へと僅かに変化するが、大きな構造等の変化は見られなかった。物理試験及び軟X線透過撮影に用いた試料は、水田では上層(15~20cm)、下層(40~45cm)、畑地では上層(10~15cm)、下層(25~30cm)で不攪乱採取した。

また、湛水時の作土の構造を観察するため、中干しを始めて表面水がなくなった頃の1990年7月7日に、同じ水田の異なる地点で採土した。土色は上層(0~10cm)で5Y 3/2(オリープ黒)、下層(35~40cm)で10YR 4/4(褐)と若干変化していた。採土は上層(0~5cm)、中層(20~25cm)、下層(35~40cm)で行った。

さらに、落水後の1991年2月7日に再度サンプリングを行った。断面は、およそ20cmと30cmに土色の境界があり、上層(0~20cm)で5Y 3/2~10Y 3/1(オリープ黒)、中層(20~30cm)で2.5Y 5/6(黄褐)、下層(30~40cm)で5Y 4/1(灰)であった。採土は、上層(10~15cm)、(15~20cm)、中層(25~30cm)、下層(35~40cm)で行った。

(2) 黒ボク土

この試料は、岐阜大学農学部付属各務原農場(岐阜県各務原市)の水田及び畑地で1990年6月25日に採土したものである。畑地はサツマイモ収穫後で、水田は1989年までは作付されていたが1990年は休耕地であった。土壌は非火山灰性黒ボク土である。

水田の土層断面は作土、心土、すき床層の境は認められず、土色は5Y 2/1(黒)であった。畑地は、表面から20cmほど耕起されており、40cm位で土色が10YR 2/1(黒)から7.5YR 4/4(褐)へと変化していた。採土は、水田では上層(15~20cm)、下層(45~50cm)、畑地では、

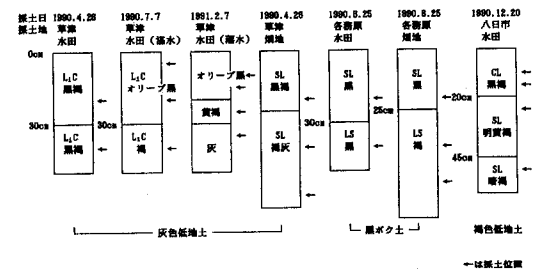


図-1 採土地点の土層断面図
Fig. 1 The soil profiles at sampling site

上層 (25~30cm), 中層 (35~40cm), 下層 (55~60cm) で行った。

(3) 褐色低地土

この試料は、滋賀県八日市市の未圃場整備水田で、1990年12月20日に採土したものである。道路を間にして溜池と隣接しているため、地下水位はその影響を受けていると推測される。土壌は褐色低地土である。採土日は晴天であったが前日までに少量の降雨があった。断面は、約20cmに作土と心土の境があり、心土は2cm以上の礫が混在している。50~70cmでは礫は減少し砂質となる。作土の土色は2.5Y 4/3 (黒褐), 心土は10YR 6/6 (明黄褐), 50~70cmの砂質土は10YR 3/3 (暗褐) である。採土は、作土上層(10~15cm), 作土下層(20~25cm), 心土(30~35cm), 下層(50~55cm)の4層で行った。

2.2 サンプラーについて

一般的な100cc円筒形サンプラーはステンレス製や黄銅製が主流であり、X線の線吸収係数が高く透過像のコントラストが低い。そこで、ここではX線透過性の良いジ

ュラルミンを用いた⁶⁾。

供試土壌は、ジュラルミン製の100cc円筒形サンプラーまたは5×5×5cmの角型サンプラーで採取し、サンプラーを装着したまま軟X線撮影した。このため供試土壌を整形する必要がなくなり、撮影が極めて容易となった。また、撮影した同一試料で物理性試験(pF試験, 透水試験)を行なうことも可能である。

2.3 供試土壌の物理性

供試土壌の物理性を表一1に示す。なお、土性は国際土壌学会法により分類、透水係数は変水位法により測定した。

2.4 試料の調整及び撮影方法

土壌の軟X線透過撮影には、防X線型キャビネットタイプの工業用破壊検査装置(ソフテックス社製SW-100AW)を用い、一管球固定一試料水平移動のステレオ撮影を行った⁶⁾。

浸剤方法は、灰色低地土については重力・毛管法*を、黒ボク土、褐色低地土については乾燥法**を用いた。

表一1 供試土壌の物理性
Table 1 Properties of soil samples

	土 壤	土性	透水係数 (cm/s)	間隙率 (%)	粗間隙率 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)		
水 田	灰色低地土 作土	LiC	1.5×10 ⁻⁶	45.8	3.2	1.43		
	代かき前 心土	LiC	6.3×10 ⁻⁶	49.7	2.1	1.34		
	灰色低地土 作土		5.0×10 ⁻⁴	54.8	4.7	1.20		
	溝水中 心土		8.2×10 ⁻⁶	48.6	3.7	1.38		
	黒ボク土	作土	SL	7.6×10 ⁻⁵	68.0	3.4	0.79	
		心土	LS	3.6×10 ⁻⁴	75.7	7.5	0.59	
		褐色低地土	作土	CL	9.3×10 ⁻⁵	59.6	2.8	1.06
			作土下層	SL	2.5×10 ⁻⁵	53.6	2.4	1.23
	心土	SL	5.3×10 ⁻⁴	47.4	2.1	1.40		
	心土下層	SL	2.3×10 ⁻²	47.6	9.8	1.42		
畑 地	灰色低地土	上層	SL	1.5×10 ⁻²	62.9	6.1	0.96	
		下層	SL	2.1×10 ⁻⁴	46.0	5.1	1.43	
	黒ボク土	上層	SL	1.2×10 ⁻³	68.1	7.8	0.86	
		中層	LS	5.4×10 ⁻³	66.8	9.7	0.75	
		下層	LS	2.0×10 ⁻³	63.6	5.1	0.97	

<脚 注>

*重力・毛管法¹⁾

土柱法や遠心法で水分状態を-15cm~-300cm(H₂O)の不飽和状態にして、造影剤を降下浸透または毛管上昇により浸入させる。造影剤は毛管力の大きな細い毛管孔隙から優先的に浸透する。毛管孔隙を主体に造影することができる。

**乾燥法¹⁾

粘性土など重力・毛管法では造影剤の浸入が困難である場合や、大孔隙から造影剤が抜け落ちてしまう場合などに有効な方法である。まず試料で飽和し、上面以外に粘土板を張りつけるか、ベントナイトペーストを塗り、上面から造影剤を浸入させる。水が降下、蒸発するに従い、徐々に造影剤が吸い込まれて行くことを利用する。径が数mmの最大孔隙を含む非毛管孔隙を主体に造影することができる。

III. 実験結果と考察

軟X線透過像をステレオ撮影し、立体視したところ以下のような知見が得られた。なお、ここでは紙面の都合上、例として写真-6についてのみステレオ写真を掲載する。

3.1 水田土壌間隙構造の経年変化

水田土壌の構造の特徴は、毎年繰り返される代かき・湛水・落水によってもたらされるものと思われる。ここでは水田土壌の間隙構造の変化を湛水中、落水後、代かき前と順を追って考察する。また、心土の間隙構造は代かきなど人為的な操作が加わりにくいため、作土層のそれと分けて考える。比較に用いた試料は灰色低地土である。

作土層は代かきによって泥状となるため、7月の時点では、少量の緩くしまったベッド間隙が観察される(写真-1①, 写真-2②)。また孔隙も2, 3本観察されるが特定の方向に発達した様子はみられない。落水後になると、作土上層では乾燥が進むとともに、粒子間隙ともとれる非常に細かい間隙が増加する(写真-3③)。また、その年の水稻根によるものと思われる孔隙も観察されるが、これもまた特定の方向に発達した様子は見られない。作土下層では鉛直方向に伸びた孔隙が観察される。粒子間隙及びベッド間隙も観察される(写真-4)。翌年の代かき前には、作土下層では、直径0.1~0.5mm程度の孔隙群が鉛直方向に発達している様子がうかがえる(写真-5)。

一方、心土では、湛水中、落水後、代かき前とも鉛直方向に卓越した孔隙が観察され、その様子にはほとんど変化が見られない(写真-6)。観察される孔隙の数は、代かき前の作土よりもかなり多いがその太さについては大きな違いはない。作土に見られたベッド、粒子間隙はほとんど観察されない。乾燥密度、間隙率、透水係数ともほとんど変化していないことから、心土の孔隙群は代かき、湛水の影響を受けることが少なく年間を通して存在し続けるものと思われた。よって、心土層では構造の季節変化は小さいとすることができる。

このように、水田土壌の構造の経年変化を追うことによって、耕起・代かき等の人為的行為が加えられる作土と、その影響の小さい心土では、間隙構造に大きな違いがあることが観察された。耕起・代かきで間隙構造を崩される水田作土層では、1年間の耕作過程で、間隙・孔隙群が再形成されている。作土上層の間隙はベッド間隙が主であるが、作土下層では孔隙の割合が増加して行くことがわかった。

ここで作土層に対する代かきの効果を、土壌の物理性

をもとに、間隙構造という視点から考察する。間隙率及び透水係数について、代かき前と湛水中を比較すると、間隙率は46%→55%、透水係数は $1.5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ → $5.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ といずれも大きくなっている。代かき前には孔隙群が、湛水中にはベッド間隙が主として観察されることから、代かきによって孔隙群は破壊されるが、ベッド間隙が増加するものと考えられる。

次に観察された粗孔隙の成因について考察する。試料を手で割ると、孔隙中に水稻根と思われる植物遺体がしばしば観察される。これは、孔隙の形成・保存に植物根が関係していることをうかがわせる。また、落水後の試料に見られたように、ベッド間隙に沿った孔隙が観察されることは、構造間の弱い面に侵入するという植物根の性質を反映していると言える。作土下層では特定の方向に発達した孔隙が見られないのに対し、心土では鉛直方向に発達した孔隙が見られる現象は、植物の屈地性より説明が可能である。ゆえに、軟X線写真上の孔隙は根成孔隙であると考えれば、これらの観察事実にも最も合理的な解釈を与える。また、心土層の孔隙群の密度の方が作土よりもかなり大きいことから、心土中の全ての孔隙に毎年根が伸入しているわけではなく、一度できた孔隙の一部は、ある程度の期間中はその構造を保持しているものと推察できる。

3.2 土壌の種類による土壌間隙構造の差異

次に、土壌による水田土壌間隙構造の差異について考察する。なお、黒ボク土、褐色低地土とも灰色低地土との比較によりその構造を論ずる。

(1) 黒ボク土と灰色低地土の比較

黒ボク土のサンプリングが6月、灰色低地土のサンプリングは4月なので、黒ボク土の方が乾燥が進んでいると思われる。

黒ボク土の上層では、細かい筋のような間隙の下に鉛直方向に伸びる孔隙が観察される(写真-7)。上半分の細かな筋のような間隙は、稲刈りの際に機械が入り土壌を攪乱・転圧したためか、もしくは乾燥が進んで層粒状になったためと考えられる。黒ボク土の下層では、灰色低地土同様、鉛直方向に卓越した孔隙群が観察される(写真-8)。ただし、その一本一本は、灰色低地土のものより太く、直径0.5~1.0mm程度である。この影響からか透水係数は上・下層とも灰色低地土と比較して格段に大きくなっている。

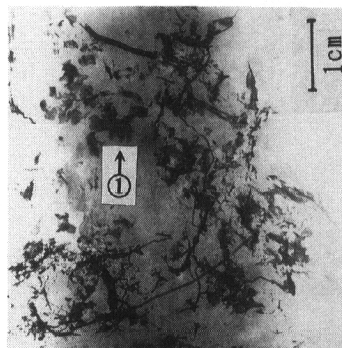
(2) 褐色低地土と灰色低地土の比較

褐色低地土作土で見られる間隙は、ベッド間隙がほとんどで孔隙は少ない(写真-9)が、間隙率については、落水後の灰色低地土よりその量は多い。この原因は、褐色低地土の透水性が灰色低地土よりも大きいために土

報文：土地利用による土壤間隙構造の差異—軟X線による観察を中心に—

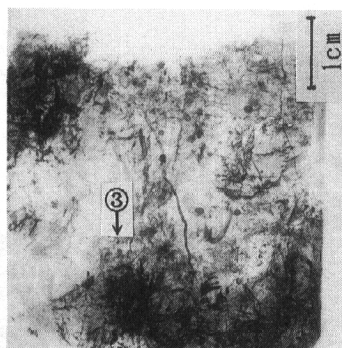
灰色低地土（水田土）
Gray lowland soils (paddy field)

湛水中
On inundation



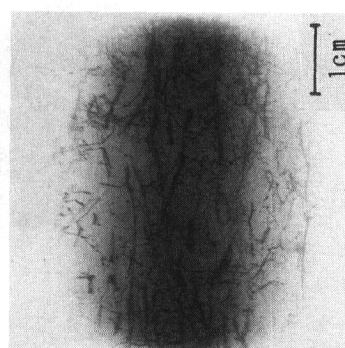
写真一 作土上層 (0 cm)
upper plow layer (0 cm)

落水後
After ponding water release

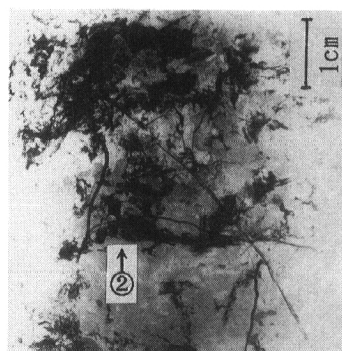


写真一三 作土上層 (10 cm)
upper plow layer (10 cm)

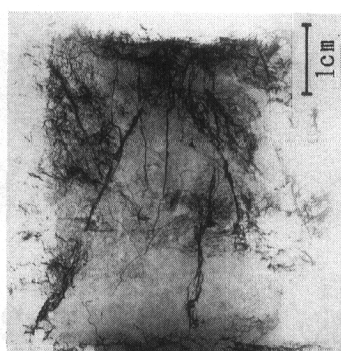
代かき前
Before puddling



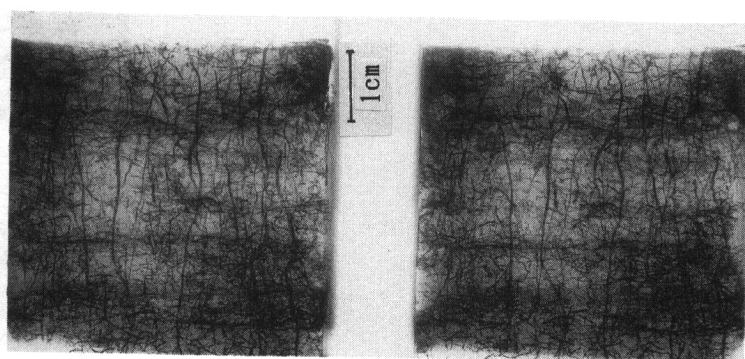
写真一五 作土上層 (10 cm)
upper plow layer (10 cm)



写真一ニ 作土下層 (20 cm)
lower plow layer (20 cm)



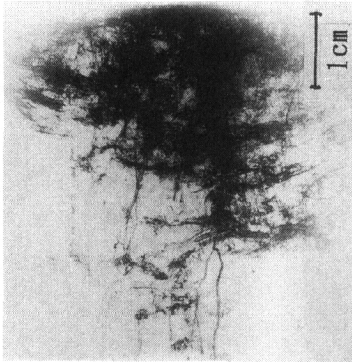
写真一四 作土下層 (15 cm)
lower plow layer (15 cm)



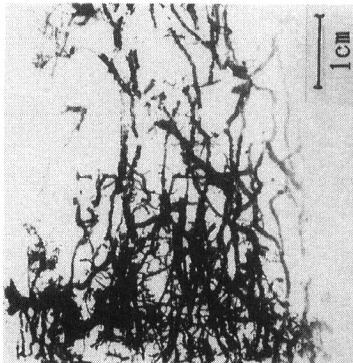
写真一六 心土 (35 cm) (ステレオ写真)
subsoil (35 cm) (stereograph)

黒ボク土 (水田)
Andosol (paddy field)

休耕中
Fallow paddy field



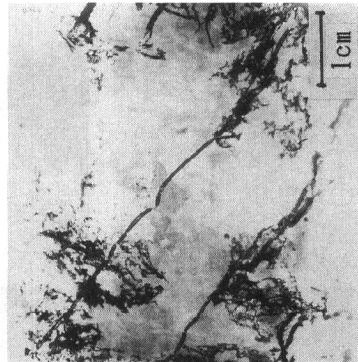
写真一七 作土 (15cm)
plow layer (15cm)



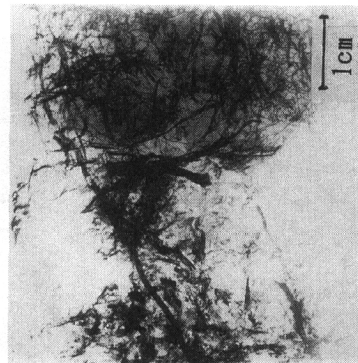
写真一八 心土 (35cm)
subsoil (35cm)

褐色低地土 (水田)
Brown lowland soils (paddy field)

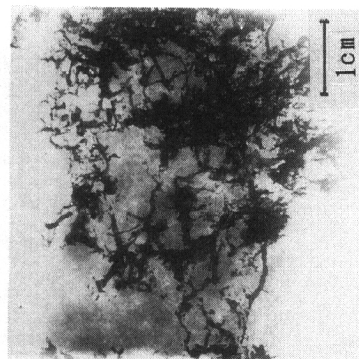
落水後
After ponding water release



写真一九 作土 (10cm)
plow layer (10cm)



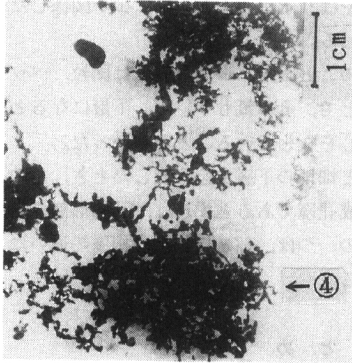
写真一〇 心土 (30cm)
subsoil (30cm)



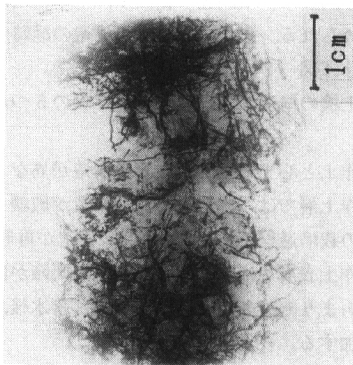
写真一一 心土下層 (50cm)
lower subsoil (50cm)

報文：土地利用による土壤間隙構造の差異—軟X線による観察を中心にして—

灰色低地土（畑地）
Gray lowland soils (upland field)

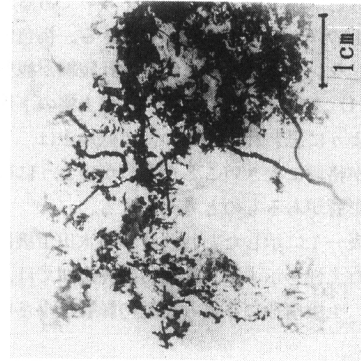


写真—12 上層 (10cm)
upper layer (10cm)

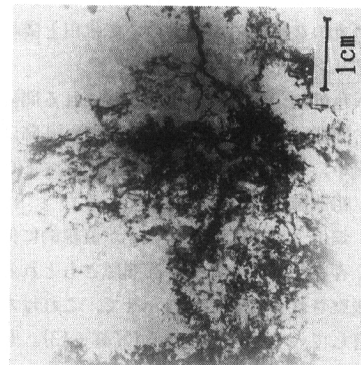


写真—13 下層 (25cm)
lower layer (25cm)

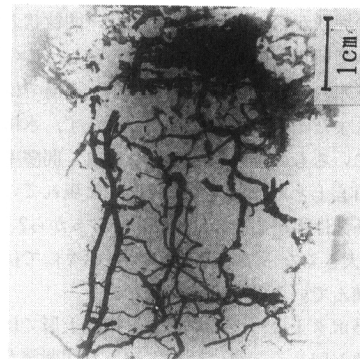
黒ボク土（畑地）
Andosol (upland field)



写真—14 上層 (25cm)
upper layer (25cm)



写真—15 中層 (35cm)
middle layer (35cm)



写真—16 下層 (55cm)
lower layer (55cm)

壤の乾燥が進んでいるからと考えられる。また、硬盤である褐色低地土中層では、灰色低地土、黒ボク土と同様の鉛直方向に伸長した孔隙が観察される(写真-10)。その太さは灰色低地土の孔隙と同じくらいである。この写真では、上の作土との境界が観察できる。褐色低地土の下層では、ランダムな方向に伸びる孔隙網が観察される(写真-11)。この様子は次に述べる畑土壌の下層と類似しているように思われた。この褐色低地土は、下層土の透水係数が格段に大きいことからわかるように砂質であり、この影響があるものと考えられる。

なお、表-1に示したとおり3つの水田土壌はそれぞれ異なった土性を示すが、今回の調査範囲では、極端な砂質以外、土壌構造に与える土性の影響は小さいものと思われる。

3.3 土地利用による土壌間隙構造の差異

水田土壌と畑地土壌では、同一種類の土壌であっても水田、畑地というその土地利用に従って土壌構造が異なるものと思われる。この差異を観察するために、灰低地土と黒ボク土の2種類の土壌について水田と隣接する畑地でサンプリングを行った。

まず、灰色低地土の畑地上層で観察される間隙は、団粒、ベッド間隙(写真-12④)が主で、孔隙はほとんど見られない。また間隙量は水田作土に比べて多い。このことは、粗間隙率の増加に現れている。

しかし、畑地下層では、1本1本が直線的に伸びた孔隙が数多く存在している。粒子間隙ともとれる細粒状の間隙が観察されることも合わせて、これは水田土壌の特徴を有していると考えられる(写真-13)。しかしながら、先程見られた鉛直方向に発達した水田土の孔隙群に比べると、その方向性が弱くなっている。

上述の事実から、水田から畑地に転換したことにより、灰色低地土畑地上層では、土壌の乾燥が進むとともに、水田土壌の泥状から、角柱状→団塊状→団粒状と構造が変化してきているものと思われる。しかし、この灰色低地土は地下水の影響を受けているので、下層では畑地化24年後でもまだ十分に乾燥が進んでおらず、水田の構造を保持しているものと思われる。これは、間隙率、乾燥密度が水田心土とほぼ同じであることに現れている。しかし透水係数は水田心土の $6.3 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ から $2.1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ へと大きくなっていることから、徐々にではあるが畑地化が進んでいると考えられる。

次に、黒ボク土についてみると、畑地上層では、灰色低地土畑地と同じく、主に団粒、ベッド間隙が観察される(写真-14)。中層になると、所々に孔隙が見られるようになり(写真-15)、下層になると団粒、ベッド間の隙間はあまり観察されなくなり、ランダムに走る孔隙網

が全体的に分散したネットワークを形成している様子が観察されるようになる(写真-16)。この下層でみられる孔隙網は上層で見られるようなベッド間隙とは考えにくく、やはり水田心土と同様に根が関係した孔隙であると思われる。

以上のことから、畑地上層では団粒、ベッド間隙がほとんどで、その量も多いが、下層になると孔隙が粗間隙の中心をなしていることがわかった。

水田と畑地の下層土を比較したとき、この孔隙が両者とも根成孔隙であるとすれば、孔隙形態の方向性の違いの原因の一つは、稲と畑作物の根系の違いによるものと思われる。

IV. ま と め

水田、畑地という土地利用の違いが土壌間隙構造に与える影響と、土壌自体のもつ性質が土壌間隙構造に与える影響を調べた。本調査の範囲で、その結果は次のようにまとめられる。また、これらの構造の経時変化を模式的に表せば図-2のようになる。

水田土壌の構造の特徴としては、次の5つが認められた。

- 1) 作土と心土とは土壌間隙構造が異なる。
- 2) 作土層では、代かきで間隙構造が破壊された後、一年間の栽培過程を経るうちに間隙構造が再形成される。
- 3) 作土表層では、ベッド・団粒間隙がほとんどで孔隙はあまり観察されない。間隙量は落水後、時間とともに増加する。
- 4) 作土下層では、代かき後は間隙が非常に少ないが、イネの根によって鉛直方向に卓越した直線的な孔隙が形

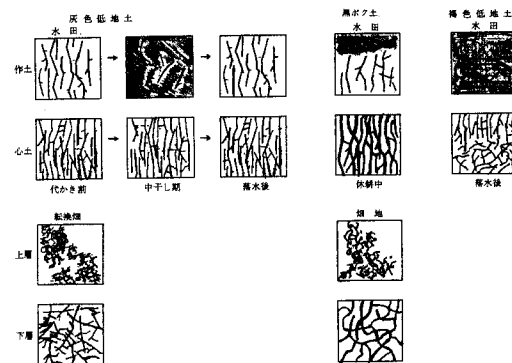


図-2 各種土壌における間隙構造の模式図

Fig. 2 The schematic diagram of soil pore structures with soil type and land-use

成されていく。

5) 心土層は鉛直方向に卓越した直線的な孔隙群が粗間隙の大部分を占める。孔隙群の密度は作土下層よりかなり大きい、太さはほぼ等しい。心土の間隙構造に経年変化は認められない。

土壌の種類による間隙構造の差異を調べたところ次のような結果が認められた。

1) 黒ボク土は団粒構造が発達しているため、作土・心土ともに孔隙の太さが灰色低地土、褐色低地土より太い。

2) 砂質土は単粒構造を持つため、心土層でも孔隙群は発達しにくい。

次に、水田土壌と比較した畑地土壌の構造の特徴を列挙すると次のようである。

1) 作土層では団粒間粗間隙の割合が大きく、表層では層粒化していて、個々の間隙形態の認識は難しい。また、孔隙は少ない。

2) 心土では、水田土壌同様に粗間隙の中心は孔隙であるが、その孔隙には方向性がなく、孔隙がネットワークを形成していると思われる。この孔隙網も根成と考えられる。

3) 転換畑では下層まで乾燥が進み、畑地化してからの年数がたつにつれ、鉛直方向に発達していた直線的な

孔隙群が減少していくものと思われる。

引用文献

- 1) 徳永光一、佐藤照男、菊池 宏、今 和則：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)—, 土壌の物理性第51号, pp 49—58 (1985).
- 2) 徳永光一、竹内正己、林 貴峰：火山下層土における粗孔隙の根成的特徴について—立体視による孔隙の軟X線透写像の観察—, 農土論集 126, pp 75—80 (1986).
- 3) 徳永光一・石田智之・矢野悟道・佐瀬 隆：土壌孔隙造影法による植物群落の地下構造の考察, 日本生態学会誌, 投稿中.
- 4) 成岡市：軟X線映像による土壌孔隙の立体計測法, 農土誌 55, pp 29—35 (1987).
- 5) 成岡市：土壌の粗孔隙の計測法とその物理的機能に関する研究, 東京農業大学総合研究所紀要, Vol. 1, pp 24—25 (1990).
- 6) 岩間憲治・多田明夫・丸山利輔・渡辺紹裕：土壌孔隙中の流体の挙動と孔隙の立体表示, 土壌の物理性, 66, pp 11—18 (1992).

(受理年月日1992年4月17日)