

報 文

圃場土壌の水移動を支配する粗間隙構造

安中 武幸\*<sup>1</sup>・井上 久義\*<sup>1</sup>・成岡 市\*<sup>2</sup>

Macropores Governing Water Movement in Soils of Agricultural Fields

Takeyuki ANNAKA\*<sup>1</sup>, Hisayoshi INOUE\*<sup>1</sup> and Hajime NARIOKA\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup>National Research Institute of Agricultural Engineering,

\*<sup>2</sup>NODAI Research Institute, Tokyo University of Agriculture

Summary

Macropores in soils of agricultural fields make the soils nonuniform and also govern the water movement phenomena occurring there. We examined the pore size which divided macropores from micropores and the sample size when sampling from soils with macropores. The former, we statistically analyzed relationships between saturated hydraulic conductivity and pore characteristics of undisturbed cylindrical soil samples. The latter, we simulated the sample size which represent the crack length in a unit area when sampling soils with cracks.

The results of the statistical analysis showed that saturated hydraulic conductivity was correlated best with the porosity for the pores whose equivalent diameter was greater than 0.1~0.03mm. And, the result of the simulation showed that the representative sample size for the crack length in a unit area had to contain 20~50 units of mesh.

On the basis of such results, we discussed an approach to make clear water movement phenomena in soils with macropores. And, following 3 subjects were proposed to be investigated.

- ① understanding of macropore system
- ② water flow in each macropore
- ③ size of block and governing law when averaging water movement phenomena in a field soil.

**Key words** : Macropore , Hydraulic conductivity, Representative value, Measurement scale, Pore structure

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 3-9, 1992)

I. はじめに

土壌中での水移動は、土壌の水分状態のみならず溶質・懸濁物質等の移動をも支配する。このため、土壌中の水移動現象は古くから多くの研究者の研究対象となり、均一土壌中の水移動現象については、その法則性はほぼ確立していると言える。

一方、不均一な圃場土壌中での水移動現象においては、均一系の理論が適用できないことが多いが、それは、大

きな間隙の存在によってダルシー則の適用が困難になること<sup>6)</sup>、および、土壌中の間隙構造が十分に把握されていないこと<sup>9)</sup>等による。

さて、圃場土壌中での水移動を支配する大きな間隙は“macropore”と呼ばれる<sup>9)</sup>が、我々は「粗間隙」をこれに対応する用語として用いたいと考えている。このような大きな間隙については、例えば、Baverら<sup>3)</sup>、Ahujaら<sup>1)</sup>のある大きさ以上の間隙量と飽和透水係数の関係についての報告、山崎ら<sup>24)</sup>、Andersonら<sup>2)</sup>、Boumaら<sup>7)</sup>、井上<sup>11)</sup>の亀裂が透水現象に果たす役割についての報告、田淵<sup>21)</sup>、田淵ら<sup>22)</sup>、成岡ら<sup>17)</sup>の管状の大きな間隙についての報告がある。

しかし、“macropore”について、大きさの絶対的基準を定めることは困難である。また、透水現象においては

\*<sup>1</sup>農業工学研究所 〒305 つくば市観音台2-1-2

\*<sup>2</sup>東京農業大学総合研究所 〒156 世田谷区桜丘1-1-1

キーワード：粗間隙，飽和透水係数，代表値，測定スケール，間隙構造

表-1 統計分析に用いた100cm<sup>2</sup>不攪乱円筒試料  
Table 1 Undisturbed cylindrical samples used for statistical analysis

	SOIL TYPE	UTILIZATION	SAMPLING LAYER	SAMPLING DATE
MIKAZUKI	alluvial	paddy	plow layer, subsoil	June, November
MIKAZUKI	alluvial	rotational	plow layer, subsoil	June, November
CHIKUGO	alluvial	rotational	plow layer, subsoil	June, November
MIZUKAMI	residual	orchard	plow layer, subsoil	July

間隙の形状やつながり度合が重要な要素であるが、このような構造性については不明な点が多い。すなわち、macropore (粗間隙) の概念を明確化することは、それ自体が重要な課題と言える<sup>4)20)</sup>。

本報告は、不均一な圃場土壌中における水移動現象を理解するためには、それを粗間隙の構造と関連させて把握することが重要であるとの立場から、不均一土壌中の水移動現象へのアプローチを模索したものである。具体的には、飽和透水性への寄与という面で他と区別される「粗間隙」が存在するか否か、100cm<sup>2</sup>円筒不攪乱試料を用いて検討した。また、「均一」と「不均一」が測定の大きさに依存する相対的概念であるとの視点から、亀裂を含む不均一な土層で亀裂密度 (単位面積当りの亀裂長さ) を測定する場合について、代表値が得られる試料の大きさを検討した。さらに、これらの結果を踏まえて、粗間隙を含む土壌中の水移動現象に関する今後の研究方向について整理した。

## II. 方 法

### 1. 100cm<sup>2</sup> 円筒試料の飽和透水性への寄与からみた間隙区分についての検討

土壌間隙は複雑な立体構造を示すが、水分特性曲線を用いれば、それを径の異なる数多くの毛管の束として近似的に把握できる。飽和透水性については、大きな間隙の量が支配要因となると考えられるが、大きさの下限をどこに設定すべきか、そもそもそのような下限は存在するのかについて統計的に検討を行った。

統計解析に用いたデータは、188個の100cm<sup>2</sup> 円筒不攪乱試料の pF-水分率と飽和透水係数である。試料を採取した圃場とその層位および時期を表-1に示した。採土地は、沖積土水田1、沖積土輪換畑2および花崗岩風化土樹園地1の計4ヶ所であり、層位は表層から下層まで含まれている。花崗岩風化土樹園地を除いては、同一圃場で6月と11月の2回採土した。

この解析は、間隙径の下限値 (pF 値) を与え、それ以上の径を持つ間隙量と飽和透水係数の回帰近似式を求め

るものである。与えた下限値ごとに異なる近似式が求まるが、その平均推定誤差を極小にする下限値が存在するか否か検討した。なお、ここで「間隙量」とは、体積率 (%) を意味している。

具体的には、ある pF 値に対応する脱水間隙量 (x) と飽和透水係数 (Ks) の間に次式を想定し、

$$\log K_s = aX + b \quad (1 \text{ 次近似}) \quad (1)$$

$$\log K_s = aX^2 + bX + c \quad (2 \text{ 次近似}) \quad (2)$$

定数 a, b, c を最小自乗法で求め、近似式の平均推定誤差 (E) を、

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (3)$$

$\hat{y}_i$ : 近似式による logKs の推定値  
 $y_i$ : 実測値  
 $n$ : データ数

で求める。

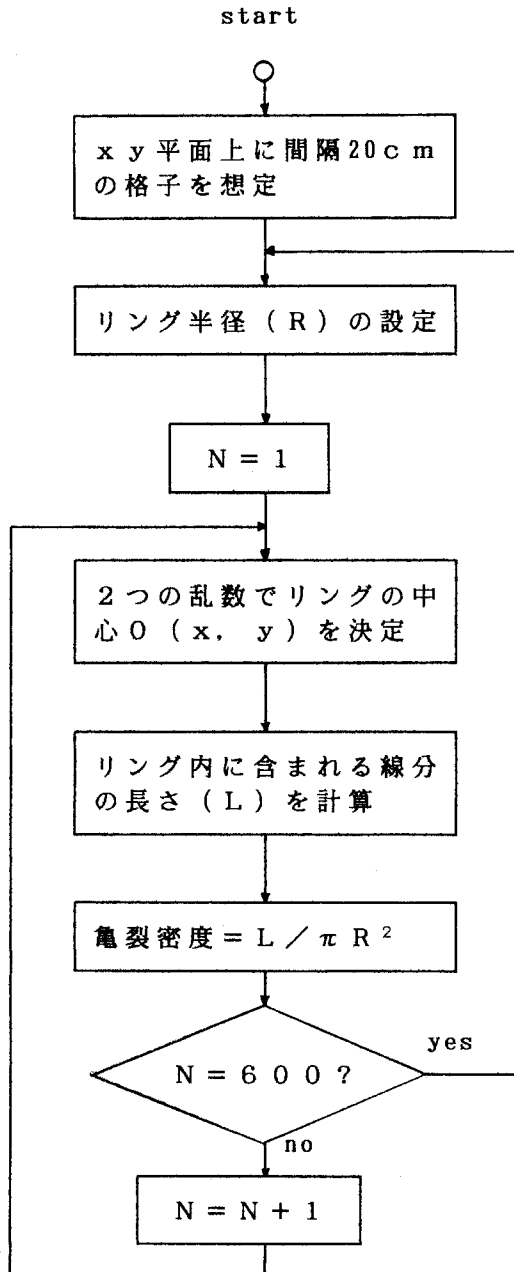
pF 値を変えて同じ計算を行い、pF 値と平均推定誤差の関係をプロットした。

### 2. 亀裂土層を代表するブロックの大きさの検討

井上<sup>12)</sup>は、重粘土圃場における調査ブロックについて、幅を1.5mと一定にし、長さを5.0m, 2.5m, 1.25mと変化させて不攪乱土壌中の水の流れ方を検討し、いずれの長さの場合にも水移動特性に差は見られなかったことを報告している。この結果は、少くとも1.5×1.25m≒1.9m<sup>2</sup>あれば、平均的な現象を表現し得ることを示しており、極めて不均一と見なされる亀裂を含む土層についても、試料の大きさを変えることによって均一と見ることができ、代表値が得られることを示唆している。

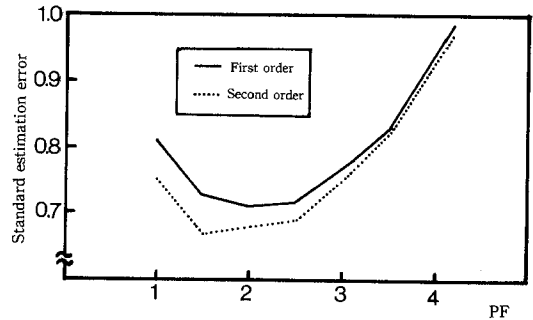
しかし、代表値が得られる試料の大きさの下限と亀裂の構造性との関係については明かでない。そこで、亀裂が格子状に存在する土層を想定し、亀裂密度 (単位面積当りの亀裂の長さ) の代表値を得るために必要な試料の大きさについて、シミュレーションにより検討した。

シミュレーションの流れを図-1に示した。井上<sup>12)</sup>の



図一 シミュレーションの流れ  
Fig. 1 Flow of the simulation

調査土層における亀裂密度が $10\text{m}^2/\text{m}^3$ 程度であることから、亀裂が間隔 $20\text{cm}$ の格子状に存在する土層を想定し、この土層表面に、ある大きさのリングをランダムに置いた時、その中に含まれる亀裂の長さを計算した。具体的には、想定された間隔 $20\text{cm}$ の格子を持つ平面に対して、



図一 飽和透水係数（対数值）—間隙量関係の近似式の平均推定誤差

Fig. 2 Standard estimation error of the approximated relationship between saturated hydraulic conductivity and pore volume emptied at each pF-value.

2つの乱数でリングの中心座標を決め、その位置に置かれたリングの内部にある線分の長さを計算した。同一の大きさのリングについては、中心位置をランダムに変えて600回反復した。1つのリング径について反復計算終了後、リング径を変えて同じ過程を繰り返した。

このようなシミュレーション結果をもとに、リング径（面積）と亀裂密度（線分長/面積）の最大値と最小値の差の関係から、亀裂密度の代表値を得るために必要なリングの大きさを検討した。

### III. 結果及び考察

#### 1. $100\text{cm}^2$ 円筒試料の飽和透水性への寄与からみた間隙区分

図一2は、飽和透水係数の対数值を、pF値に対応する脱水間隙量の1次及び2次の回帰近似式で表わした時の平均推定誤差を示したものである。近似式の平均推定誤差が、間隙量を求める径の下限値（pF値）によって変化する様子を表わしている。

飽和透水係数については対数をとっているため、縦軸の平均推定誤差はオーダーを表わしている。平均推定誤差は $0.65\sim 1.00$ オーダーと、かなり大きな値を示している。これは同一の間隙量に対する飽和透水係数の変動幅が大きいことを表わしている。

また、1次近似（(1)式）より2次近似（(2)式）の誤差が小さく、1次近似ではpF 2.0、2次近似ではpF 1.5で誤差が極小となっている。すなわち、pF 1.5~2.0（等価径 $0.1\sim 0.03\text{mm}$ ）より大きな間隙量を用いた時、同一の間隙量に対する飽和透水係数の変動が最も小さくなることが示された。これよりも大きな間隙のみでは変動が大

大きく、小さな間隙を加えていくと変動が大きくなっていく。

もし、全ての間隙が試料の上下端を貫く毛管であれば、このような極小値は存在せず、全間隙率で表わした近似式が最も誤差を小さくする。したがって、この結果は、最大間隙から  $pF 1.5 \sim 2.0$  で脱水される間隙までが飽和透水係数に大きく寄与することを示すと考えられる。ここで示された  $pF 1.5 \sim 2.0$  に対応する等価径 ( $0.1 \sim 0.03 \text{ mm}$ ) 以上の間隙を、飽和透水性への寄与が大きいことから支配間隙であると考え、「粗間隙」と呼ぶことにする。

このように、 $pF 1.5 \sim 2.0$  で脱水される間隙 (等価径  $0.1 \sim 0.03 \text{ mm}$ ) を境に、飽和透水性への寄与が異なるという結果は、間隙の大きさの違いが、つながり度合の様な構造性の違いを伴うことを示唆している。そこで、粗間隙としての粒団間隙、亀裂、管状孔隙という3つの形態<sup>20)</sup>について、その構造上の特徴・水移動への影響を整理してみる。

粒団間隙は、粒団の粒径組成とその空間的配列による複雑な形状をした間隙であり、最小断面であるネックが保水・透水性との関係で重要であることが知られている<sup>13)</sup>。圃場での存在実態については、田淵<sup>21)</sup>の土壤薄片の顕微鏡観察などがあるが極めて例が少なく、よく分かっていない。しかし、団粒構造の発達した土壤では、団粒間隙と団粒内間隙の大きさやつながりに不連続があり、それが水移動に影響を及ぼす要因となっていることが知られている<sup>19)</sup>。

亀裂は土壤の乾燥に伴う収縮挙動が拘束されるために土壤に生じる割れ目であり、土壤マトリックスの間隙と

は大きさの面で不連続である。図-3および表-2は、重粘土圃場 (畑状態) に設定した  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  のプロット表面に発達した亀裂の観察例である<sup>11)</sup>。降雨と乾燥による幅の変化は大きい長さは小さいことが分かる。図-4は、重粘土圃場心土の亀裂の観察例であるが、鉛直断面上には約  $20 \text{ cm}$  間隔、水平断面上には約  $10 \text{ m}^2$ 、幅  $1 \sim 2 \text{ mm}$  程度の亀裂の発達がみられる<sup>12)</sup>。このような亀裂を含むブロックと土壤マトリックスの透水性に  $4 \sim 5$  オーダーの違いがあることが報告されている<sup>12)</sup>。  $100 \text{ cm}^2$  円筒では、幅  $1 \sim 2 \text{ mm}$  の亀裂を含む試料の採取は困難だが、それより小さな亀裂でも透水性に大きな影響を与えることは容易に推察できる。

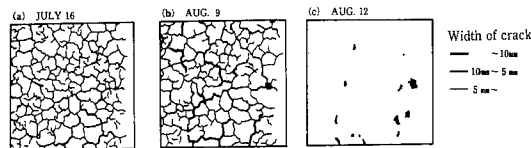


図-3 圃場表面に発達する亀裂の状況<sup>11)</sup>  
Fig. 3 Cracks on the soil surface of the test field<sup>11)</sup>

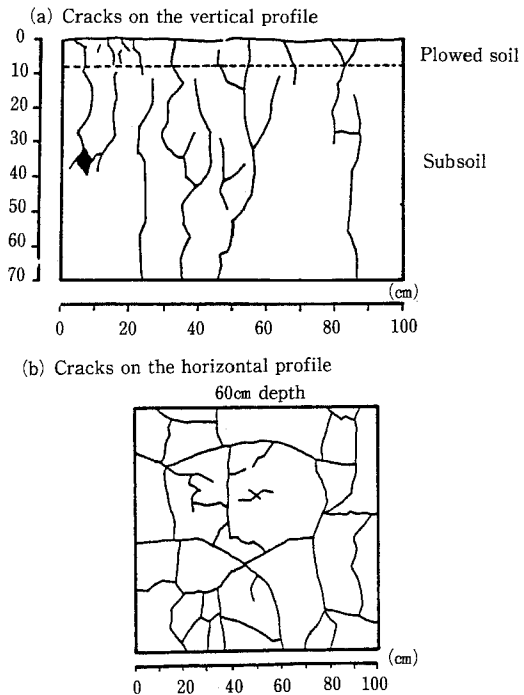


図-4 圃場心土に発達する亀裂の状況<sup>12)</sup>  
Fig. 4 Cracks in the subsoil of the test field<sup>12)</sup>

表-2 圃場表面の亀裂の発達状況<sup>11)</sup>  
Table 2 Development of cracks on the soil surface<sup>11)</sup>

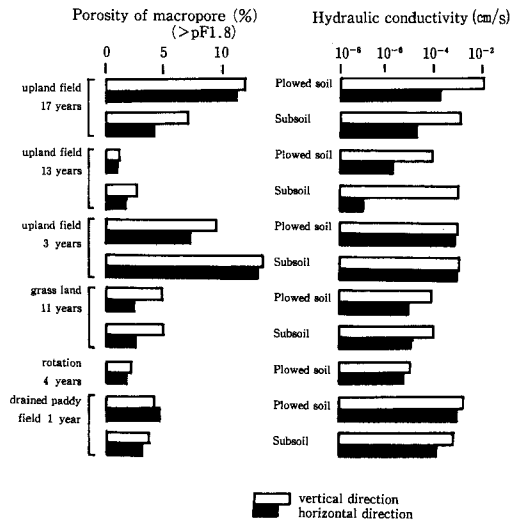
DATE	LENGTH OF CRACKS OF EACH WIDTH ( $\text{m}/\text{m}^2$ )						TOTAL LENGTH ( $\text{m}/\text{m}^2$ )	AREA ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )
	$\sim 1 \text{ mm}$	$1 \sim 3 \text{ mm}$	$4 \sim 6 \text{ mm}$	$7 \sim 8 \text{ mm}$	$9 \sim 10 \text{ mm}$	$11 \text{ mm} \sim$		
7.10	11.5	8.2	1.1	0	0	0	20.8	275
7.16	5.5	9.5	6.5	0.5	0	0	22.0	579
7.25	3.4	9.2	6.1	3.4	0	0	22.1	754
8.9	4.1	6.4	7.3	1.0	3.2	0	22.0	869

表-3 水田耕盤における飽和透水係数の異方性<sup>16)</sup>  
 Table 3 Anisotropy of hydraulic conductivity in paddy field plowsole<sup>16)</sup>

	DEPTH cm	TEXTURE	$K_V^*$ cm/s	$K_H^{**}$ cm/s	$K_V/K_H$
FUKUSHIMA	15	SiC	$1.61 \times 10^{-5}$	$2.01 \times 10^{-7}$	8.0
BIWAKO	15	SiC	$4.67 \times 10^{-4}$	$6.86 \times 10^{-6}$	68.1

\*  $K_V$  : hydraulic conductivity for vertical direction

\*\* $K_H$  : hydraulic conductivity for horizontal direction

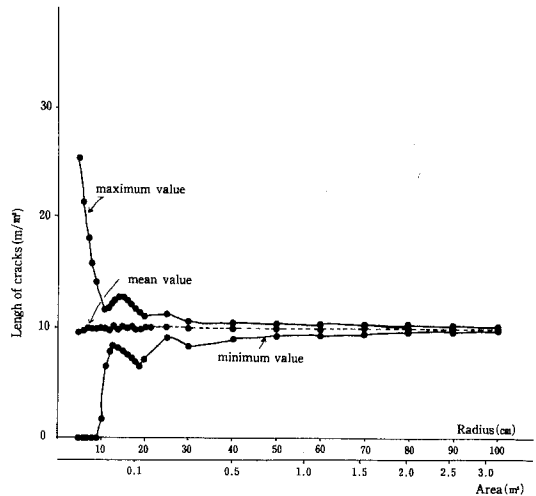


図一五 鉛直および水平方向の粗間隙率と飽和透水係数<sup>16)</sup>

Fig. 5 Porosity of macropore and hydraulic conductivity for vertical and horizontal directions.<sup>16)</sup>

管状孔隙は植物根の貫入・腐朽や土壌動物の通行などによって形成されるが、軟 X 線立体撮影法によって、水田および輪換畑耕盤層に形成されているその特徴が明らかになってきた<sup>16)</sup>。水田耕盤では、太い管路のほとんどは鉛直に近い方向に走り、内径は約0.3mmから1.0mm程度で、屈曲度が1.3mm/mm（直線距離の約30%増の延長）で伸びている。一方、輪換畑耕盤では、基本的骨格としては水田耕盤型と類似するが、内径約1.0mm、屈曲度約1.7mm/mmである。水田耕盤の飽和透水係数に異方性が見られることを横井ら<sup>25)</sup>、増島<sup>15)</sup>、徳永ら<sup>23)</sup>が報告しているが、管状孔隙の存在がその重要な要因となっている。表-3および図-5は、水田および輪換畑耕盤の飽和透水係数の実測値であるが<sup>16)</sup>、いずれも鉛直方向に透水性が優越している。

このように、粒団間隙、亀裂、管状孔隙はそれぞれ



図一六 試料内に含まれる亀裂の長さ

Fig. 6 Length of cracks included in circles of various sizes.

土壌中において周囲の間隙（土壌マトリックス内の間隙）とは不連続な大きさを持ち、そのつながり度合も強い。すなわち、大きな間隙がつながり度合も強いことについて、定性的には理解される。しかし、100cm<sup>2</sup>円筒試料内の間隙構造が明かでないため、今回得られた粗間隙の下限値（等価径0.1~0.03mm）についての定量的な議論は困難である。

今回の検討は、100cm<sup>2</sup>円筒試料について行った。他の大きさの試料で同様の検討を行った場合の予測は容易ではないが、間隙の大きさとつながり（広がり）度合の関係がポイントとなると考えられる。

## 2. 亀裂土層を代表するブロックの大きさ

図-6に、リング半径（面積）と亀裂密度の最大値・最小値および平均値との関係を示した。リング半径が10cm（直径20cm）未満の場合は全く亀裂を含まないことがあり、最大値と最小値は大きく異なる。しかし、平均値は10m/m<sup>2</sup>に近い値を示している。リング半径が10cmを越えると、リング内には必ず亀裂が含まれるようになり、最大値と最小値の差が小さくなっていく。Newman-

Marsh 法<sup>14)15)</sup>による亀裂長さの測定精度が 5~10%であることから、最大値と最小値の差が 0.5~1 m/m<sup>2</sup> 以下になるリングの大きさを求めると、半径 50cm (面積 0.8m<sup>2</sup>) ~半径 80cm (面積 2 m<sup>2</sup>) 以上となる。

圃場調査との対比を考えるため、「リング」を「試料」と置き換える。亀裂密度の推定誤差を最大値と最小値の差で評価したのは、試料が大きくなると反復測定が困難であるため、1回の測定で評価することを前提としたためである。すなわち、このモデル土層については、1回の測定で亀裂密度の代表値を精度 5~10%水準で得るために、概ね 1~2 m<sup>2</sup> 以上の試料が必要であると推定される。この試料の大きさは、土層ブロックの水移動特性から得られた値 (1.9m<sup>2</sup>) に近い値となった。

Bouma<sup>9)</sup>は、REV (representative elementary volume: 代表値が得られる大きさ) を決めるには ELUS (elementary units of soil structure: 土壌構造の単位) を見分けることが必要であり、REV は少なくとも ELUS を 20 以上含むべきであると報告している。今回の検討では、ELUS が 20cm×20cm=400cm<sup>2</sup>、REV が 8,000~20,000 cm<sup>2</sup> であり、「REV ≥ 20×ELUS」という Bouma の基準と合致している。

もしこの基準が一般的に成り立つとすれば、ELUS について知ることが代表値を得る大きさ (REV) 決定につながる。そして、それは均一系として平均的な現象を扱う基礎を与える。

#### IV. 今後の研究の展開方向

100cm<sup>2</sup> についてではあるが、等径径 0.1~0.03mm 以上の間隙が飽和透水性に大きく寄与することが示された。また、圃場土壌の飽和透水性測定に際して、測定値が大きな変動を示すことおよび試料の大きさによって違う値を示すことが、よく指摘される。これらは、圃場土壌の間隙構造を十分に把握することの必要性を示すものである。

また、不均一な土壌中の水移動現象を粗間隙中の流れと土壌マトリックス中の流れに区分して扱う場合、粗間隙はマトリックス中の水移動にとって境界条件となる<sup>9)</sup>。この場合、境界としての粗間隙の構造性を把握することが重要であるとともに、粗間隙中での水の流れの実態が重要な問題となる。

さらに、不均一な系はその ELUS、REV に基づいて均一系とみなせるとしても、その場合には、グルシー則の成立は限らずしも保証されないと考えられる。したがって、平均化された均一系で成立する平均則を検討することが必要である。

このようなことから、圃場土壌中の水移動を解明するために必要な研究内容を、① 粗間隙構造の把握、② 個々の粗間隙における水の流れ、③ 平均化スケールと平均則の 3 つに整理した。

##### (1) 粗間隙構造の把握

圃場土壌に存在する粗間隙の形態、その大きさと存在密度、さらには広がりや相互のつながり等を知り、それらの知見と水の移動を関連付けていくことが必要である。

粗間隙構造の把握手法として、土壌薄片の顕微鏡観察、軟 X 線撮影法、染料注入法などがある。これらの方法を用いた粗間隙構造の実態把握とともに、粗間隙をその成因・生成過程から見ていく必要がある。

##### (2) 個々の粗間隙における水の流れ

個々の粗間隙における水の流れ方は、方向による間隙形状の相違、さらには重力の作用によって、水平方向と鉛直方向では大きな違いが生じてくる。

亀裂や管状孔隙の場合、鉛直方向への水の流れは、壁面を伝って自由水の流下 (薄膜流) などとして把握されているが、その時、水の流れる場所の評価方法がまだ明確にはなっていない<sup>9)10)</sup>。このことは、水の流れを把握する上で基本的な問題であり、さらに、これら粗間隙と土壌マトリックス間の水や溶質の移動を考える上でも不可欠な問題である。

また、水平方向の水移動は飽和状態で生起する場合が主であるが、粗間隙の大きさやその連続性に影響されるものと考えられる。したがって、流れの特性を明確にするためには、粗間隙の大きさや連続性と流れの関係を明らかにする必要がある。

さらに、粗間隙網における水の流れのより一般的な特性を把握するためには、粗間隙とマトリックスとの相互作用<sup>9)</sup>についても検討していく必要がある。

##### (3) 平均化スケールと平均則

不均一な系を均一系とみなすには、ELUS、REV を決定する必要があり、その時の平均則を検討することが必要であることを述べた。このことも含め、現象把握の目的に応じたスケールでの平均化が必要と考えられる。粗間隙構造の把握、および、個々の粗間隙中での水の流れを前提として、それぞれの平均化スケールにおける法則性を検討する必要がある。

#### V. ま と め

不均一な圃場土壌中での水移動現象を明らかにするために、粗間隙構造に着目したアプローチ方法を模索した。飽和透水係数を間隙量 (体積率) の回帰近似式で表わす場合、同一の間隙量に対して飽和透水係数が大きな変動

を示すこと、および、 $pF$  1.5~2.0で脱水される間隙量(等価径0.1~0.03mm)が推定誤差を最小にすることが明らかとなった。このことは、粗間隙を区分する大きさの存在を示すとともに、間隙の大きさがそのつながり度合とも関連していることを示唆している。また、亀裂を含む土層において、亀裂密度の代表値が得られる大きさは格子の大きさの20倍以上となり、Boumaの示している基準と合致した。これらの結果を踏まえ、今後、① 粗間隙構造の把握、② 個々の粗間隙中での水の流れ、③ 平均化スケールと平均則について、研究を進める必要があることを述べた。

### 引用文献

- 1) Ahuja, L. R., J. W. Naney, R. E. Nielsen : Macroporosity to characterize spacial variability of hydraulic conductivity and effects of land management, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48**, pp. 699-702, 1984.
- 2) Anderson, L. L. and J. Bouma : Water movement through pedal soils. II. Unsaturated flow, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41**, pp. 419-423, 1977.
- 3) Baver, L. D. : Soil permeability in relation to non-capillary porosity, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **3**, pp. 52-56, 1938.
- 4) Beven, K. : Micro-, meso-, macroporosity and channeling flow in soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, pp. 1245-1246, 1981.
- 5) Beven, K. and P. Germann : Water flow in soil macropores. II. A combined flow model, *J. Soil Sci.*, **32**, pp. 15-29, 1981.
- 6) Beven, K. and P. Germann : Macropores and water flow in soils, *Water Resour. Res.*, **18**, pp. 1311-1325, 1982.
- 7) Bouma, J. and L. W. Dekker : A case study of infiltration into dry clay soil. I. Morphological observations, *Geoderma*, **20**, pp. 27-40, 1978.
- 8) Bouma, J. : Soil variability and soil survey. In soil spatial variability, *Pudoc Wageningen*, pp. 130-149, 1985.
- 9) Bouma, J. : Using morphometric expressions for macropores to improve soil physical analyses of field soils, *Geoderma*, **46**, pp. 3-11, 1990.
- 10) 波多野隆介, 佐久間敏雄, 岡島秀夫 : メチレンブルートレーサー法による水みちの分布状態, *日土肥誌*, **54**, pp. 490-498, 1983.
- 11) 井上久義 : 亀裂が発達した粘質圃場における暗渠排水特性, *農土論集*, **137**, pp. 25-33, 1988.
- 12) 井上久義, 長谷川周一, 宮崎 毅 : 亀裂が発達した圃場における水の横浸透, *農土論集*, **134**, pp. 51-60, 1988.
- 13) Iwata, S., Tabuchi, T., Warkentin, B. P. : Soil-Water Interactions, *DEKKER*, pp. 195-220, 1988.
- 14) Marsh, B. a'B. : Measurement of length in random arrangements of lines, *J. Appl. Ecol.*, **8**, pp. 265-267, 1971.
- 15) 増島 博 : 水田下層土における飽和透水係数の異方性, *日土肥誌*, **41**, pp. 119-120, 1970.
- 16) 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*, pp. 1-58, 1991.
- 17) 成岡市, 駒村正治, 高須俊行 : 立川ロームにおける管状孔隙が地下水涵養に果たす役割, *土壌の物理性*, **56**, pp. 1-14, 1988.
- 18) Newman, E. L. : A method of estimating the total length of root in sample, *J. Appl. Ecol.*, **3**, pp. 139-145, 1966.
- 19) Philip, J. R. : The theory of absorption in aggregated media, *Aust. J. Soil Res.*, **6**, pp. 1-19, 1968.
- 20) Skopp, J. : Comment on " Micro-, Meso-, and Macroporosity of soil" , *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, p. 1246, 1981.
- 21) 田淵公子 : 土壌薄片の顕微鏡観察による土壌間ゲキの研究, *農土研別冊*, **7**, pp. 21-31, 1963.
- 22) 田淵俊雄, 田淵公子, 長田 昇 : 関東ロームの大間隙と透過性との関係, *農土研別冊*, **7**, pp. 53-60, 1963.
- 23) 徳永光一, 佐藤照男, 菊地 去, 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*, **51**, pp. 49-62, 1985.
- 24) 山崎不二夫, 八幡敏雄, 竹中 肇, 田淵敏雄 : 北海道小向の重粘土の暗キヨ排水における心土キ裂の役割, *農土研*, **30**, pp. 427-434, 1963.
- 25) 横井 肇, 池宗勝三郎, 水野要蔵, 小柳芳郎 : 土壌の透水係数の方向性について, *日土肥誌*, **40**, pp. 271-275, 1969.

(受稿年月日1991年4月20日)