

亀裂が発達した粘土質圃場における 水移動現象のモデル化

井上 久義

Modelling of water movement in a clayey agricultural
field with shrinkage cracks

Hisayoshi INOUE

National Research Institute of Agricultural Engineering

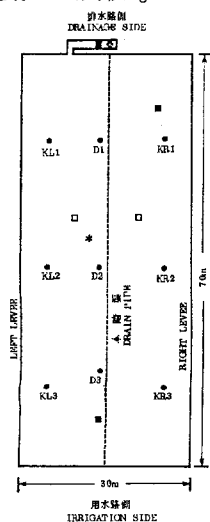
1. はじめに

圃場中には、乾燥亀裂や、虫・小動物または植物根に由来する穴など、いわゆる大孔隙が存在することが多く、この大孔隙が土壌中における水や溶質の移動に極めて重要な役割を果たしている。

このような現象の定量的表現は、土壌中での大孔隙の存在状態やその連続性をどのように表すのか、また、大孔隙を伝わる水の流れ方をどう表現するのかなど、基本的な問題がまだ明らかになっていないため、これまでいくつかのモデルが提案されてきたが、まだ、完成されたとはいえない。

圃場全体での水移動に果たす亀裂などの大孔隙の役割をモデル化するに当たっては、一つ一つの大孔隙の存在状態や、それを伝わる水の移動特性から圃場全体を推定することはほとんど不可能である。このため、大孔隙の役割を圃場全体として捉え、モデル化し、これを評価していくことが重要となる。

この報告では、この考え方に基づき、亀裂が発生した粘土質圃場を対象として、この亀裂網が圃場における水移動に果たす役割のモデル化をおこなった結果について以下報告する。



- 圃場表面亀裂測定用プロット(1×1m)
OBSERVING PLOT FOR CRACKS OF SOIL SURFACE(1×1m)
- 心土亀裂測定用プロット(1×1m)
OBSERVING PLOT FOR CRACKS OF SUBSOIL(1×1m)
- * テンシオメータ
TENSIO METERS
- 圃場内水位測定用観測孔(φ=0.15m)
MEASURING HOLES FOR GROUND WATER LEVEL IN THE TEST FIELD
- ◎ 暗渠排水量測定用自記水道メータ
FLOW METER FOR PIPE DRAINAGE DISCHARGE
- 表面排水量測定用三角堰
MEASURING WEIR FOR SURFACE DRAINAGE DISCHARGE

図-1 試験圃場の概要

Fig. 1 Outline of the test field and observing points

2. 対象とした報告の特性

(1) 圃場の概要

対象としては、農業工学研究所内にある、広さ70m×30mで、深さ0.7mにビニル底を持つ有底試験圃場を

用いた(図-1)。この試験圃場は、1977年(昭和52年)に、重粘土の沖積水田心土を充填して造成した圃場で、その暗渠配置は次の通りである。まず、本暗渠は、圃場造成時(1977年)に、圃場底上、長辺方向中央に、管径60mmの暗渠管が1本埋設された。さらに、弾丸暗渠

表-1 圃場の土壌の物理的特性

Table 1 physical properties of soil in the test field

	DEPTH (m)	STRUCTURE	DRY DENSITY (kg/m ³)	SOLID RATIO (%)	TEXTURE	VOLUMETRIC WATER CONTENT(%)			HYDRAULIC CONDUCTIVITY(cm/s)	
						SATURATED	3.2KPa (pF1.5)	100KPa (pF3.0)	SATURATED	3.2KPa (pF1.5)
PLOWED LAYER	0~0.12	CRUMB	1.15	47.8	LiC	52.2	46.1	33.9	0.6~2.0 ×10 ⁻³	2.1 ×10 ⁻⁷
SUBSOIL	0.12~0.7	PRISMATIC	1.46	54.2	HC	45.8	45.4	42.6	0.6~1.0 ×10 ⁻⁶	1.8 ×10 ⁻⁷

(直径100mm)は、1980年2月に本暗渠と直行する方向に、深さ0.35m、約1.2m間隔で設置された。この圃場は、1978~1980年は水田、1981~1984年は大豆を主とした畑として利用され、この報告で述べる各種試験をおこなった1985~1986年にかけては、裸地状態で管理した。

(2) 土壌の特性

表-1には、試験圃場の土壌の物理的特性を示す。この圃場の土層状態は、大きく作土と心土とに分けることができた。作土は、厚さ0.1m程度しかないが、屑粒化しており、その透水係数は、10⁻³~10⁻⁴cm/sオーダーと比較的高い値を示した。一方、心土には、圃場底にま

で達する乾燥収縮に伴う亀裂が約0.2m間隔に存在し、その構造は大きな角柱状構造を示した。しかしながら、心土マトリックス部分は、壁状構造でpF1.5(-3.2KPa)等価径以上の大きな孔隙はほとんど存在せず、その透水係数も10⁻⁶~10⁻⁷cm/sオーダーと極めて小さな値を示した。

(3) 試験圃場における降雨排水の実体

表-2には、試験圃場における、1985年4月~10月までの降雨に伴う排水の実体を示す。この表にみられるように、本圃場からの表面排水率は、降雨量が非常に多い場合を除いて多くの場合が1%以下で、表面排水がほと

表-2 試験圃場の降雨排水特性

Table 2 Hydrological property of the drainage from the test field

DATE	RAINFALL (mm)	PIPE DRAINAGE DISCHARGE (mm)	REQUIRED TIME FOR PIPE DRAINAGE DISCHARGE (h)*	EFFICIENCY OF PIPE DRAINAGE DISCHARGE (%)**	EFFICIENCY OF SURFACE DRAINAGE DISCHARGE (%)***
APR. 20	9.0	3.5	2.0	39.0	0.0
APR. 23	51.0	36.4	1.5	71.3	1.4
MAY 20	39.5	12.6	13.5	31.8	0.2
MAY 24	25.0	10.7	3.5	47.4	0.5
MAY 29	22.5	2.7	12.5	12.3	0.3
JUNE 13	33.5	22.1	14.0	65.9	0.3
JUNE 18	88.5	65.1	12.0	73.6	6.4
JUNE 24	27.0	23.0	6.5	85.0	0.2
JUNE 27	188.5	91.5	5.0	48.5	40.7
JULY 14	23.5	17.3	0.5	80.3	0.4
AUG. 10	25.5	2.9	0.5	11.4	0.0
AUG. 30	80.0	31.1	7.5	38.9	10.5
SEP. 28	28.0	22.7	11.0	81.0	0.2
TOTAL	628.0	341.6		54.4	5.4

* Required time until the pipe drainage discharge begins after the time when the rainfall began
 ** Ratio of the pipe drainage discharge to the rainfall
 *** Ratio of the surface drainage discharge to the rainfall

んど生じていないといえる。これに対して、暗渠排水率は、降雨量の70~80%にも達することがあり、この圃場では、降雨のほとんどが暗渠によって排除されているものといえる。

図-2には、本圃場からの降雨排水のハイドログラフの一例を示す。暗渠排水量は、5月24日、25日の降雨とも、降雨開始後速やかにピーク流量に達し、降雨パターンに暗渠流量がかなり鋭敏に対応している。このことから、圃場に降った雨が極めて迅速に、暗渠流として圃場から排除されていると言える。

(4) 試験圃場における水の流れ方

以上の特性から、本圃場における水の流れ方は次のように考えることができる。まず、本圃場の降雨排水は、そのほとんどが暗渠によっておこなわれ、また暗渠流量は、降雨開始後速やかにピーク流量に達するということから、土壤中を暗渠に向かって水が迅速に移動しているといえる。この時、心土マトリックスの透水係数は極めて低く、一方、心土には圃場底まで達する亀裂が約0.2m間隔に発達していることから、この迅速な水の移動は、亀裂を伝わる水の流れによるということが出来る。つまり、本圃場では、降った雨が心土亀裂へと流れ込み、この亀裂を伝わり迅速に暗渠へと移動するという水の移動構造が考えられる。

本圃場において推定されるこのような水移動をモデル化するに当たっては、これを確認し、量的に表現していく必要がある。このため、以下の3点について調査・実験をおこなった。以下、その結果について述べていく。

- ① 圃場内の亀裂の存在状態、および存在量。
- ② 土壤中の水の移動経路、およびそれを伝わる水の流れの物理的特性。
- ③ 暗渠流量変化からみた圃場全体での水の移動特性。

3. 亀裂の状態

亀裂の存在状態は、土壌の垂直断面上、および、深さ0.1、0.25、0.6mの各水平断面上の亀裂をスケッチすることにより把握した³⁾。

測定は、圃場の攪乱による影響を防ぐため、すべての試験が終了した1986年5月におこなった。スケッチは、土壌断面上に、糸で0.1m幅にメッシュを切った1m×1mの大きさの木枠をかぶせ、枠内に存在する亀裂の位置と幅を正確に方眼紙上に記録するという方法でおこなった。亀裂の長さの推定は、根の長さを推定するとき用いられるNewman-Marshの方法によった^{4,7)}。これは、ある領域内に存在する亀裂の長さが長いほど、その

領域にかぶせたメッシュ線と亀裂との交差する数が多くなる、という考え方をNewmanが確率論的に展開したもので、ある領域に存在する亀裂の長さは、次式で推定することができる。

$$R = \frac{\pi \cdot A_r \cdot N}{2 \cdot M} \dots \dots \dots (1)$$

- R : 領域内に存在する亀裂の長さ
 A_r : 領域の面積
 N : 領域にかぶせたメッシュ線と亀裂の交差点数
 M : 領域にかぶせたメッシュ線の総延長

図-3には、試験圃場の垂直断面および水平断面上の亀裂の存在状態を示す。本圃場の心土には、圃場底にまで達する亀裂の発達がみられた。この亀裂は、弾丸暗渠よりも浅い部分では、それより深い部分よりもかなり密に発達している傾向が窺えた。

表-3には、心土水平断面上に発達した亀裂の長さを示す。亀裂の長さは、弾丸暗渠よりも浅いところでは20m/m²、深いところでは10m/m²あり、その幅はいずれも1~2mm程度であった。これらの数字を用いて計算すると、この圃場全体に存在する心土亀裂量は、約20~40m³となり、圃場全体体積の1.5~3%を占めることになる。また、弾丸暗渠より深い部分では7~15m³となり、深さ0.35m以下の圃場体積の1~2%を占めるものと推定される。

4. 土壌ブロック中の水の流れ方

亀裂が発達した土壌中の水の移動経路を確認し、その水の流れ方の物理的特性を知るために、山崎ら⁸⁾の方法を参考として圃場に図-4に示すような不攪乱土壌ブロックを設定し実験をおこなった²⁾。ブロックの大きさは5m×1.44mあり、ブロック中央には深さ0.35mのところには弾丸暗渠が1本通っている。土壌ブロック側面には、水に浸した粘土を塗り付け、その上にビニルシートを貼付けた後埋め戻し、実験中、水が横に逃げないように処理をした。一方、端面は堀削による攪乱部分をソイルナイフなどで取り除き、亀裂の開口部の潰れなどが生じないように処理をした。

実験は、図のピットA、Bに水を貯め、両水面高に差を与えることによって水をブロック内に横浸透させ、その流量を測定するという方法でおこなった。ピット内の水位の与え方は、深さ0.35mに弾丸暗渠が存在するこ

井上:亀裂が発達した粘土質圃場における水移動現象のモデル化

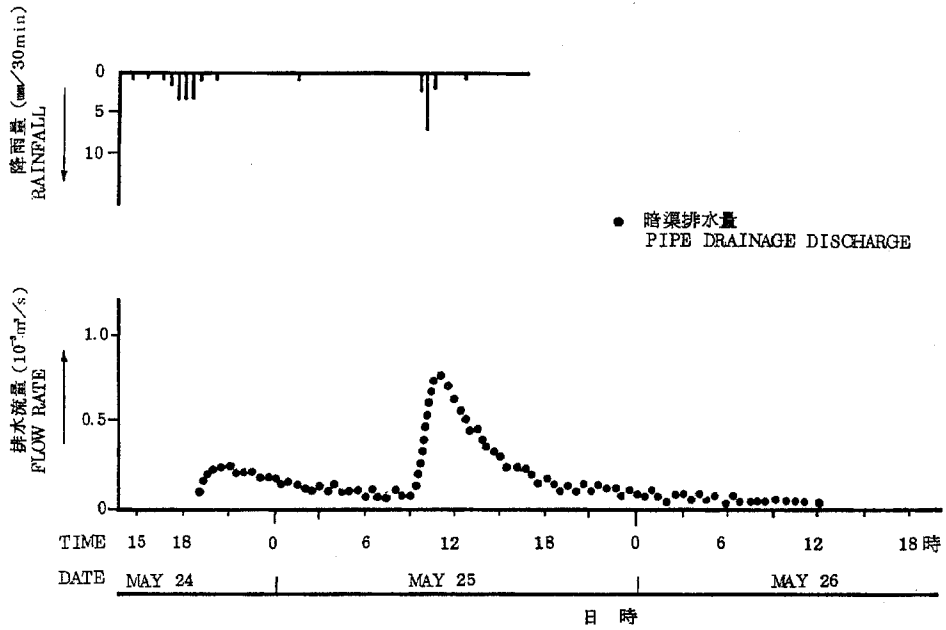


図-2 試験圃場からの降雨排水特性

Hydrograph of drainage discharge from the test field by rainfall

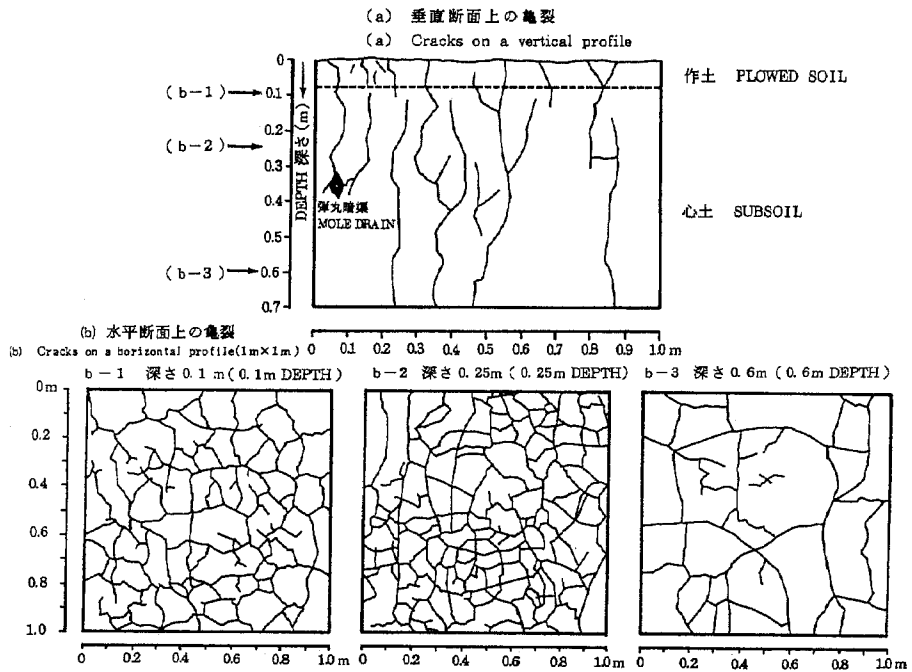


図-3 心土亀裂の発達状況 (1×1m)

Cracks in the subsoil of the test field

表-3 心土水平断面上の亀裂の発達状況
 Table 3 Development of cracks on the horizontal sections
 of the subsoil in the field

DEPTH (m)	LENGTH OF CRACKS (m/m ²)	WIDTH OF CRACKS (mm)
0.1	18.0	1~2
0.25	22.8	1~2
0.6	10.1	1~2

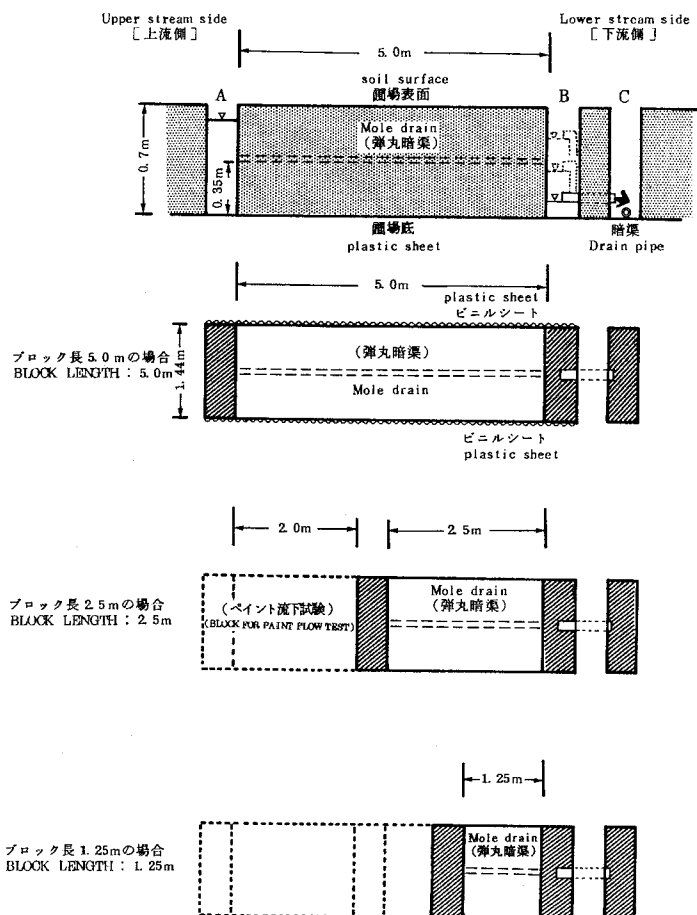


図-4 横浸透試験ブロックの概要

Outline of the soil blocks for the lateral flow test

とを考慮して、弾丸暗渠が常に水面下に存在する場合（下流側水深0.45m）と、弾丸暗渠が常に水面上にある場合（下流側水深0.2m）の二通りを設定した。横浸透流量の測定は、上流側初期水深を下流側水深+0.1mとして、上流側水深が低下する中での浸透流量の変化を追跡した。なお、この時、上流側水深の低下は極めて遅いため、流量測定時での水位差でそれぞれ定常状態が成立しているものとしてデータを取り扱った。ブロック長5mにおける上記の実験の終了後、ブロック長をさらに2.5m、1.25mとして同様の実験をおこなった。

以上の横浸透試験の終了後、上流側に残った長さ約2mのブロックを用いて、これに5～6倍に薄めた水溶性白色ペイントを流し、ブロック内水みちの調査をおこなった。調査は、白色ペイント流下後、上流側から0.15、1.15および2.0mの各点で、土壌断面上の染色部分をスケッチする方法で行った。

この実験は、1986年4～5月にかけておこなった。この実験期間中（約1ヶ月）、土壌ブロックの乾燥を防ぐため土壌ブロックを浸水状態で維持したが、心土の亀裂の変化はほとんど認められなかった。

表-4 土壌ブロックの透水性

Table 4 Hydraulic conductivity of the soil block (cm/s)

(a) BLOCK LENGTH : 5.0m

DIFFERENCE OF WATER LEVELS $H_1 - H_2$ (m)	WATER LEVEL IN THE LOWER PIT H_2	
	0.45m	0.17m
0.13	————	5.4×10^{-2} cm/s
0.12	————	2.4
0.11	————	2.1
0.10	————	1.8
0.09	1.2×10^{-1} cm/s	1.5
0.08	1.2	————
0.07	1.3	————
0.06	1.4	————
0.05	1.5	————
0.04	1.5	————
0.03	1.6	————

(b) BLOCK LENGTH : 2.5m

DIFFERENCES OF WATER LEVELS $H_1 - H_2$ (m)	WATER LEVEL IN THE LOWER PIT H_2	
	0.41m	0.20m
0.10	————	4.2×10^{-2} cm/s
0.09	5.6×10^{-2} cm/s	4.4
0.08	5.9	4.5
0.07	6.1	————
0.06	6.4	————
0.05	6.5	————
0.04	6.6	————

(c) BLOCK LENGTH : 1.25m

DIFFERENCES OF WATER LEVELS $H_1 - H_2$ (m)	WATER LEVEL IN THE LOWER PIT H_2	
	0.46m	0.21m
0.13	————	3.2×10^{-2} cm/s
0.12	————	3.3
0.11	————	————
0.10	————	3.3
0.09	————	3.3
0.08	3.6×10^{-2} cm/s	————
0.07	3.7	4.0
0.06	————	4.1
0.05	4.3	————
0.04	4.4	————
0.03	————	————
0.02	4.8	————
0.01	5.5	————

(H₁ : Water level in the upper pit)

図-5には、白色ペイント流下後の、土壤ブロック断面の染色状態を示す。図中の実験は染色された亀裂を、点線は染色されなかった亀裂を示す。また、ハッチング部分は染色された亀裂壁面を示す。白色ペイントを流下させた時、染色されるのは亀裂および弾丸暗渠のみで、土壤マトリックス部分はまったく染色はみられなかった。つまり、この土壤ブロックでは、亀裂と弾丸暗渠が非常に有効な水みちとして機能していることがわかる。

表-4は、この土壤ブロックの水の流れやすさを、ダルシー側が成り立つものとしてDupuit-Horchheimerの式(2式)から求められる透水係数値で評価した結果を示す。

これから、この土壤ブロックの水の流れやすさは、透水係数にして $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度となることがわかる。この値は、心土マトリックスの透水係数が $10^{-6} \sim 10^{-7}$

$$Q_b = \frac{K_b \cdot W_b \cdot (H_1^2 - H_2^2)}{2 \cdot L_b} \dots (2)$$

Q_b : ブロックからの流出量 (cm^3/s)

K_b : ブロックの透水係数 (cm/s)

W_b : ブロックの幅 (cm)

L_b : ブロックの長さ (cm)

H_1 : 上流側水深 (cm)

H_2 : 下流側水深 (cm)

cm/s しかないことを考えると、水みちとしての亀裂や弾丸暗渠の存在により、土壤の透水性が極めてよくなっていることを示している。

図-6には、水位が高く弾丸暗渠が水みちとして機能する場合の動水勾配と浸透流速との関係を示す。ここで、流速は横浸透水のほとんどすべてが、直径0.1mの弾丸暗渠のみを流れるものとして求めた値である。また、動

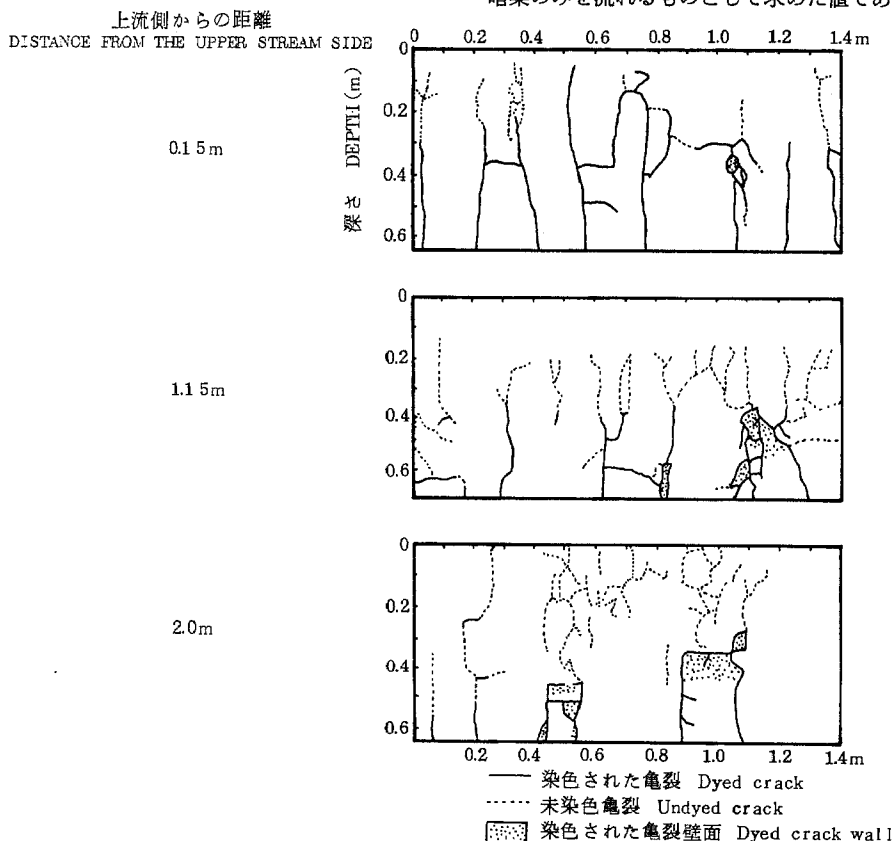


図-5 土壤ブロック内の亀裂の存在形態

Dyed pattern by the paint on the profiles of the soil block

水勾配は、上・下流間の水位差を土壌ブロック長で除した値である。この場合には、流速が大きく、また、動水勾配が増加すると流速が次第に頭打ちとなる傾向がみられることから、ダルシー的な流れ方は示さないものと推定される。ただし、この時、ブロック長を変化させることにより、動水勾配と流速の関係が別々の曲線として現われ、両者の関係は試料の大きさの影響を強く受けていることがわかる。このことから、弾丸暗渠が水みちとして機能する場合には、水の流れ方を現場サイズよりも小さな試料を用いて定量的に表現することが難しいものと考えられる。

図-7には、水位が低く、心土亀裂のみを水が流れる場合の動水勾配と流速の関係を示す。この場合には、ブロック長の変化によらず、両者の関係は1つの曲線として表現される。つまり、心土亀裂網を伝わる場合の水の流れの現れ方は、試料の大きさの影響を受けがたく、少なくとも今回の実験の最小長(1.25m)あれば表現し得るものと考えられる。そして、この時の水の流れ方は、初期の動水勾配が小さいところでは流速は急増するものの、それ以降は、動水勾配と流速の関係はほぼ直線関係となる。このことから、心土亀裂網を伝わる水の流れ方は、概ねダルシー的な特性を示すものと考えられ、この

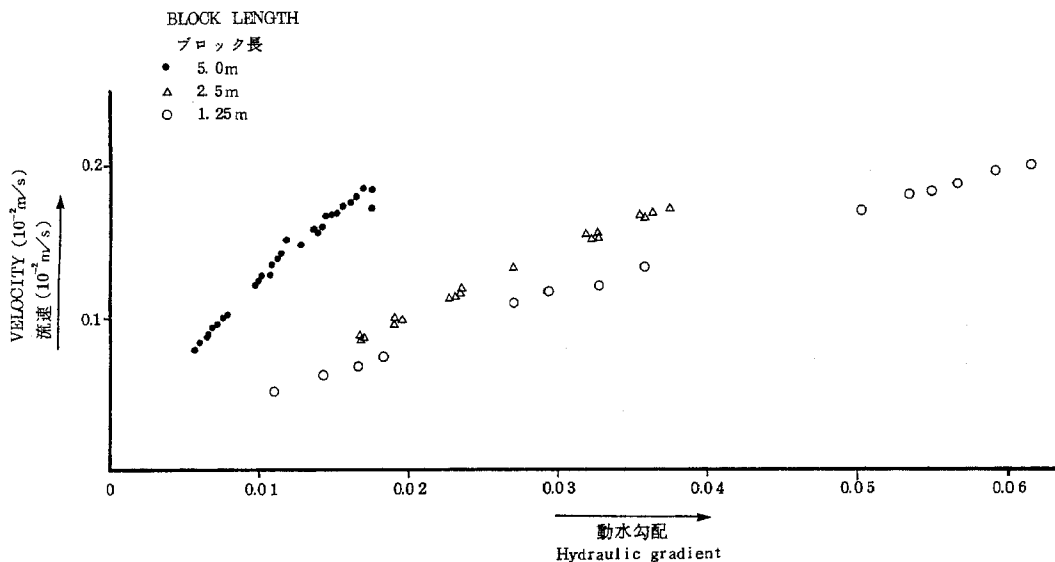


図-6 弾丸暗渠内流速と見かけの動水勾配の関係

Relation between estimated velocity of water flow through the mole drain and apparent hydraulic gradient

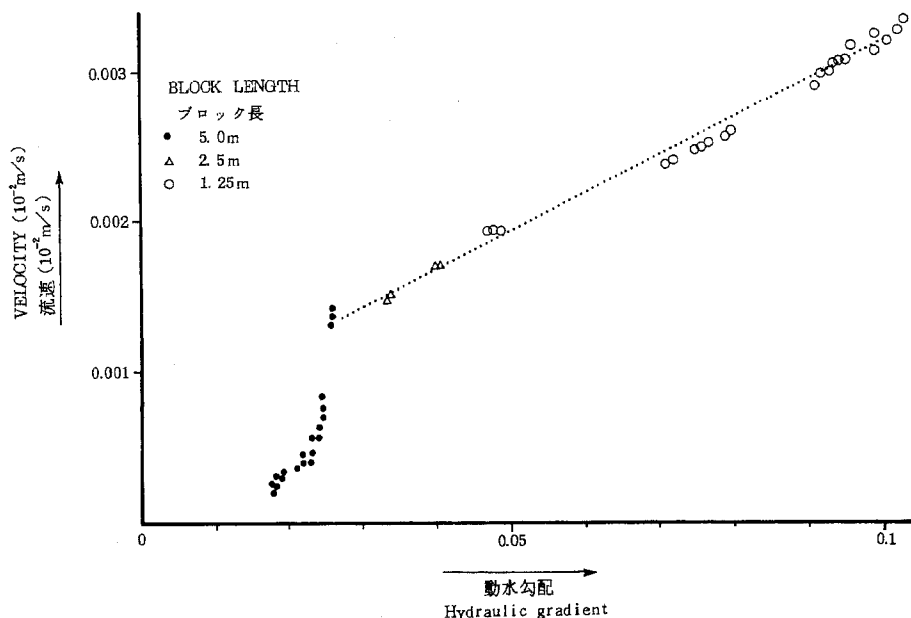


図-7 心土亀裂のみを水が流れる場合の流速と動水勾配の関係
Relation between velocity of water flow through
the subsoil cracks and apparent hydraulic gradient

時の透水係数は、前の結果から $1 \sim 5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度となるものと推定される。なお、この場合にみられる、初期の流速の急増については、今後、より精密な実験によって明らかにしていく必要がある。

5. 試験圃場における暗渠流量の遞減特性

圃場レベルからみた水移動特性に強く影響を受ける暗渠排水量変化、特にその遞減特性に注目し、圃場全体からみた水移動特性を把握した³⁾。試験は、圃場に湛水が生じるまで灌水し、ほぼ一昼夜放置した後、表面排水口を開いて湛水を排除し、湛水面と圃場表面がほぼ一致した時点で暗渠口を開き、その後の暗渠流量を追跡するという方法でおこなった(暗渠排除試験)。暗渠流量の測定は、日記水道メータによった。また、暗渠流量測定中、予め圃場に設置しておいた9個の観測孔(直径約0.15m、図-1)において、圃場内水位の変化も併せて経時的に測定した。

図-8は、暗渠開放後の暗渠流量の遞減曲線を示す。

この遞減曲線は大きく二つの部分に分けることができる。一つは、暗渠開放後約3時間経過時から10時間経過

時までの間にみられる部分で、暗渠流量は、時間にほぼ比例して低下していく。以降、この部分を線形低下部と呼ぶものとする。他の一つは、暗渠開放後約10時間経過時以降にみられる部分で、いわゆる、指数関数的な曲線を描いて低下していく。以降、この部分は、指数低下部と呼ぶものとする。

図-9には、暗渠開放時から開放後6時間経過時までの、圃場中央における観測孔内水位変化を示す。この水位の低下は比較的速く、心土マトリックスの透水性が極めて低いことから、これは、亀裂内に発生する水位とみなすことができる。また、この水位は、暗渠開放後少なくとも6時間経過時まではいわゆるカマボコ型の水面形を示さず、場所によらず、畦畔側でも暗渠直上でもほぼ一様な低下を示した。さらに、線形低下が開始する暗渠開放後約3時間経過時には、圃場内水位は地表下約0.1mの作土と心土の境界付近に位置している。このことから、線形低下および指数低下の遞減特性を示す暗渠排水は、心土部分からの排水とみなすことができる。

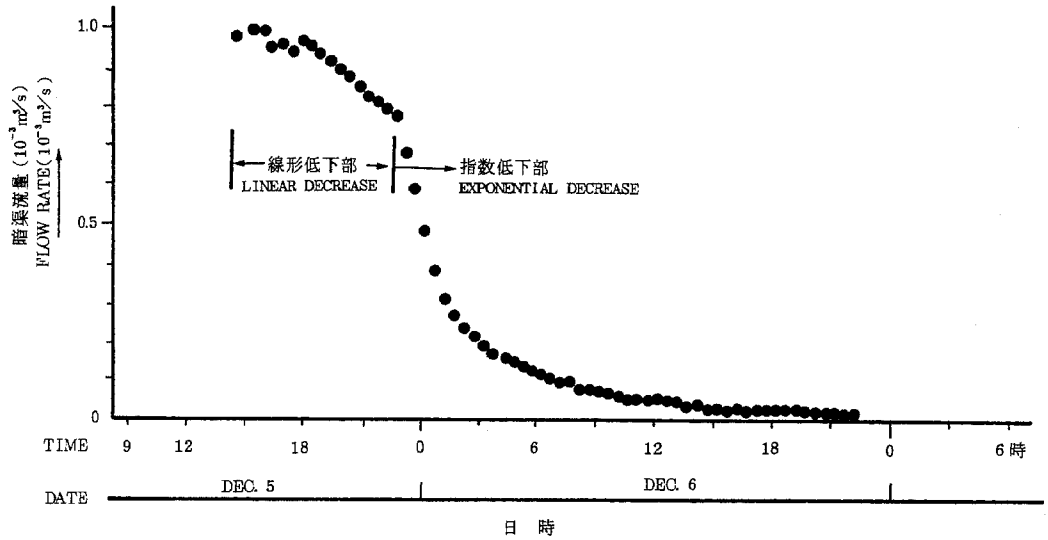


図-8 暗渠排水試験における暗渠流量の通減曲線
 Recession curve of the pipe drainage discharge
 in the pipe drainage test

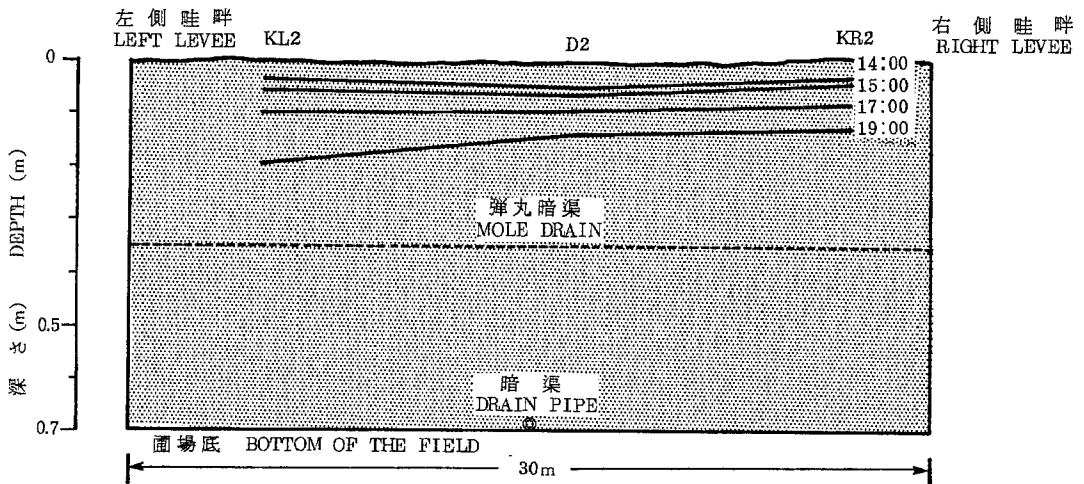


図-9 圃場中央における水位変化
 Change in water level at the center of the test field

6. 亀裂が発達した粘土質圃場における水の移動特性

(1) 線形低下部の水の移動特性

線形低下部の遞減特性は次のように表すことができる。

$$Q = Q_0 - C_0 \cdot t \dots (3)$$

$$Q \cdot dt = -A_w \cdot dh \dots (4)$$

Q : 暗渠流量 (m^3/s)

Q_0 : 初期暗渠流量 (m^3/s)

C_0 : 係数 (m^3/s^2)

A_w : 圃場内水面面積 (m^2)

t : 時間 (s)

h : 圃場内水位 (m)

ここで、(3)式は暗渠流量が時間に比例して低下することを示し、(4)式は、圃場内水位が場所によらずほぼ一様に低下することから、暗渠からの排水量 ($Q \cdot dt$) により圃場内水位が dh だけ低下することを示している。この時、圃場内水面面積 (A_w) の値は、水のほとんどすべてが亀裂のみを伝わり流れ、また、圃場内水位は亀裂内水位とみなし得ることから亀裂の占有面積とみなすことができる。

(3)式を微分すると(5)式となり、これを(4)式に代入すると $Q \sim h$ の関係を示す微分方程式(6)式が得られる。

$$dQ = -C_0 \cdot dh \dots (5)$$

$$C_0 \cdot A_w \cdot dh = Q \cdot dQ \dots (6)$$

この(6)式を、 $h=0$ の時 $Q=0$ となるという初期条件の下に解くと、その解は(7)式ようになる。

$$2 \cdot C_0 \cdot A_w \cdot h = Q^2$$

$$Q = (C_1 \cdot h)^{1/2} \dots (7)$$

$$\text{ただし、} C_1 = 2 \cdot C_0 \cdot A_w$$

このように、線形低下部では、暗渠流量が圃場内水位の平方根に比例するという関係が導かれる。これは、水が貯ったタンク底に設置した小オリフィスからの流出の際にみられる関係と同様な関係である。

ここで、暗渠排水試験の線形低下部を最小自乗法で近似すると(8)式のように表される。

$$Q = 1.076 \times 10^{-3} - 8.6 \times 10^{-9} \cdot t \dots (8)$$

また、この式から $Q \sim h$ の関係を求めると(9)式となり、この時、圃場内水面面積 (圃場内亀裂占有面積、 A_w) は $96.0 m^2$ となる。前述の亀裂量調査から弾丸暗渠より浅い部分の亀裂の長さは約 $20 m/m^2$ であるので、これらの値から亀裂幅を求めると約 $2 mm$ と推定される。この値は、心土亀裂幅 ($1 \sim 2 mm$) とほぼ一致する。

$$8.61 \times 10^{-9} \times 96.0 \cdot h = 0.5 \times Q^2 \dots (9)$$

さらに、(8)、(9)式から $h \sim t$ の関係を導くと(10)式のようになる。

$$h = 6.05 \times 10^5 \cdot (1.076 \times 10^{-3} - 8.61 \times 10^{-9} \cdot t)^2 \dots (10)$$

図-10には、(10)式で求められた圃場内水位の低下と実測値との比較を示す。圃場水位の低下の計算結果は、圃場での実測値よりも若干速いものの、低下傾向は両者ほぼ一致している。また、遞減曲線の線形低下部と指数低下部の境界となる暗渠開放後10時間経過時の圃場内水位をこの式から求めると $h \approx 0.35 m$ となる。この値は試験圃場の弾丸暗渠設置位置に当たる。つまり、線形低下部では、水みちとしての弾丸暗渠の影響を強く受けているものと推定される。

不攪乱土壌ブロックを用いた実験により、弾丸暗渠が水みちとして機能する場合には、この弾丸暗渠を伝わり、迅速な水の移動が生じることがわかっている。この時の水の移動速度が暗渠からの排水能力を大きく超える場合には、圃場内水面はフラットな形に近ずき、圃場内水位は場所によらず一様に低下する。加えて、この時の暗渠からの流量変化は、オリフィスからの流出の際に見られ特性と類似した特性を示すようになる。つまり、線形低下部の暗渠排水特性は、本圃場における暗渠排水能力と、それを超える弾丸暗渠を伝わる迅速な水移動により生じた現象であろうと考えられる。そして、圃場内水位が低下して、弾丸暗渠が水みちとして機能しなくなると、暗渠排水特性はまったく別なものへと移行する。

(2) 指数低下部の水の移動特性

指数低下部は、前項の考察から、圃場内水位が弾丸暗渠以下となり、水が心土亀裂のみを流れる場合の排水特性と考えることができる。不攪乱土壌ブロックを用いた実験から、心土亀裂のみを水が流れる場合には、その流

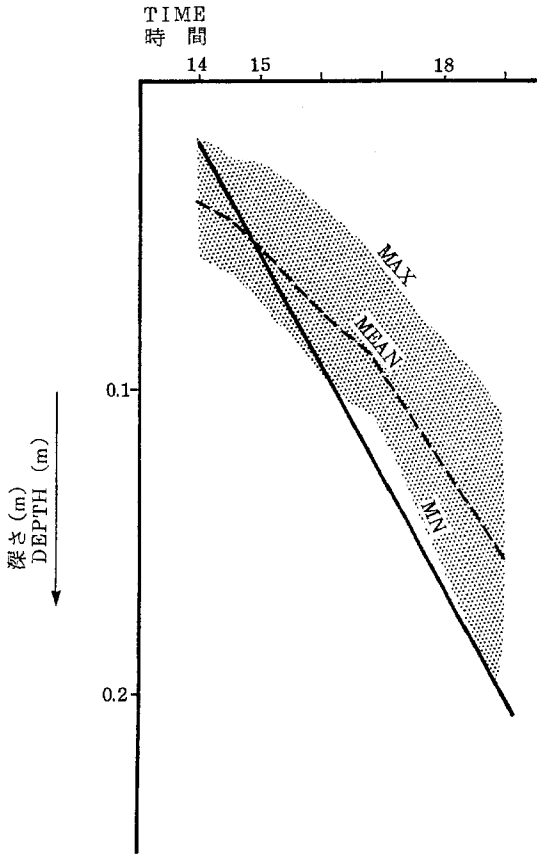


図-10 暗渠排水試験中の圃場内水位の変化
Change in water level in the field during the pipe drainage test

これは概ねダルシー流となることが明らかとなっている。そこで、指数低下部は、水がダルシー的に圃場内を流れる場合の排水特性であるとして以下の解析を進める。

ダルシー則が成り立つ場合、非定常状態の暗渠流量及び圃場水位変化はGloverの式¹⁾で表される。これは、(11)式の微分方程式の解析解で、暗渠が不透水層上にある場合の暗渠流量と暗渠中間部での水位の経時変化は、それぞれ(12)、(13)式で表される。初期流量は、長堀ら²⁾は定常状態のHooghoudtの式(14)式)が適用されるとし、さらに、長堀ら³⁾はこれらの式を用いてライシメータからの暗渠流量を推定し、実測値とよい適合を得たことを報告している。

$$F_e \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = K \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(h \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) \dots (11)$$

$t = 0$ の時 $h = H_0$
 $x = 0$ の時 $h = 0$

$$\frac{h}{H_0} = \left(\frac{9 \cdot K \cdot H_0}{2 \cdot F_e \cdot L_p^2} + 1 \right)^{-1} \dots (12)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{9 \cdot K \cdot H_0}{2 \cdot F_e \cdot L_p^2} + 1 \right)^{-2} \dots (13)$$

$$Q_0 = \frac{4 \cdot K \cdot H_0^2}{L_p} \cdot L_d \dots (14)$$

- F_e : 排水可能孔隙率 (m³/m³)
- K : 圃場の透水係数 (m/s)
- H_0 : 初期圃場内水深 (0.35m)
- h : 圃場内水深 (m)
- Q_0 : 初期暗渠流量 (m³/s)
- Q : 暗渠流量 (m³/s)
- L_d : 暗渠の長さ (70m)
- L_p : 暗渠の間隔 (30m)

非定常状態での暗渠流量変化は、(13)式に示すように $(at+b)^{-2}$ という関数形で表される。そこで、この関数形を用いて、指数低下部の暗渠流量変化を最小自乗法により近似すると、この曲線は(15)式のように表される。これは、図-11に示すように実測曲線に非常によく適合する。ただし、この時、指数低下が始まる時間を $t = 0$ としている。

$$Q = (2.36 \times 10^{-3} \cdot t + 32.8)^{-2}$$

$$= 9.30 \times 10^{-4} \cdot (7.20 \times 10^{-5} \cdot t + 1)^{-2} \dots (15)$$

ここで、暗渠の間隔 (L_p) を30m、暗渠の長さ (L_d) を70m、そして、初期水深 (H_0) を0.35mとすると、(14)、(15)式から K (圃場の透水係数) $= 8.13 \times 10^{-2}$ cm/s また、(13)、(15)式から F_e (排水可能孔隙率) $= 0.02$ という値が求められる。前述の不攪乱土壌ブロックを用いた実験での心土亀裂のみを伝わる場合の透水係数 (K_0) は、 $1 \sim 5 \times 10^{-2}$ cm/sであった。上式から求められた圃場の透水経過 (K) は、この K_0 の値と比較すると若干大きいもののオーダー的には一致する。一方、この指数低下部の排水は、弾丸暗渠より深い心土部分からの排水であり、心土マトリックスには表-1に示すようにPF1.5(-3.2KPa)相当以上の粗孔隙はほとんど存

在しない。このことから、指数低下部の排水に寄与する孔隙量(排水可能孔隙率 F_v)は、弾丸暗渠以深の心土亀裂量とほぼ一致するはずである。そして、亀裂量の調査から、弾丸暗渠以深の心土亀裂の容積率は1~2%と推定され、上式から求められた排水可能孔隙率($F_v = 0.02$)は、この心土亀裂容積率とほぼ等しくなる。

このように、指数低下部は、弾丸暗渠より深い心土部

分からの排水と考えることができ、この時の水の流れ方は、非定常ダルシー則を表わすGloverの式で非常によく近似することができる。そして、この時求められる係数值(K, F_v)も圃場の状態をよく反映している。このことは、指数低下部では水はダルシー的に流れるという仮定の正しさを立証するものであり、この場合の透水係数は 10^{-2} cm sオーダーであろうと推定される。

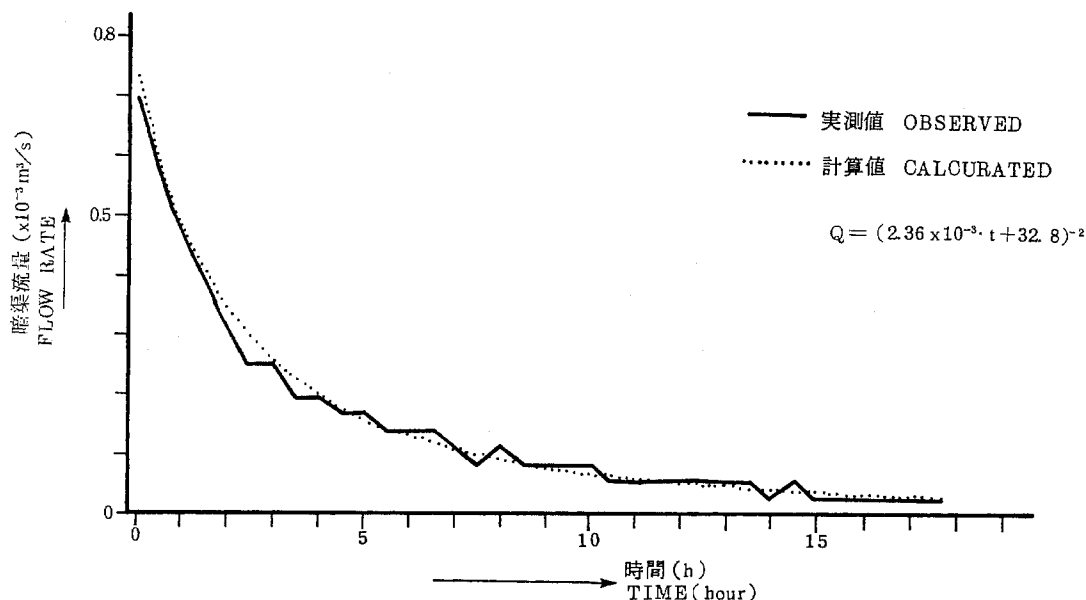


図-11 指数低下部のGloverの式による近似

Approximation of the exponential decrease in the recession curve of pipe drainage test

(3) 降雨に伴う暗渠流量の遞減特性への適用

図-12に、1985年に降った雨のうち表面排水が生じるような大きな降雨(4降雨)に伴う、試験圃場からの暗渠流量の遞減曲線を示す。この図にみられるように、いずれの降雨の場合も、暗渠排水試験の時と同様に暗渠流量の遞減曲線は、線形低下部と指数低下部の二つに分割することができた。

表-5には、4降雨のそれぞれの遞減曲線について、線形低下部および指数低下部の各々を(3)、(3)式で近似させた結果を示す。いずれの場合も実測値と計算値の誤差は、暗渠排水試験における誤差と同程度かそれ以下となり、(3)、(3)式で非常によく近似されていることがわかる。なお、図-13には、計算結果の一例(6月18日降雨の場合)を示す。

表-5に示すように、線形低下部の近似によって求められた直線の勾配は、 $-5 \times 10^{-9} \sim -1 \times 10^{-8}$ と、暗渠排水試験の場合(-8.61×10^{-9})とほぼ同程度の傾きを示し、また、圃場内水面面積(A_w)も $70 \sim 110 \text{ m}^2$ と、暗渠排水試験結果(96 m^2)と同様の値を示した。一方、指数低下部の近似によって得られた圃場の透水係数(K)は、 $4 \sim 7 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ となり、暗渠排水試験や不攪乱土壌ブロックを用いた実験から求められた透水係数とオーダー的に一致した。さらに、排水可能孔隙率(F_v)はいずれの場合も約2%となり、圃場内亀裂量とほぼ等しくなる。このように、自然降雨の場合も、本試験圃場での暗渠に向かう水の移動は、圃場内水位により弾丸暗渠が水みちとして機能する場合(線形低下部)と心土亀裂のみを水が流れる場合(指数低下部)の二つに分けることができる。加えて、これらを近似した時に求められる

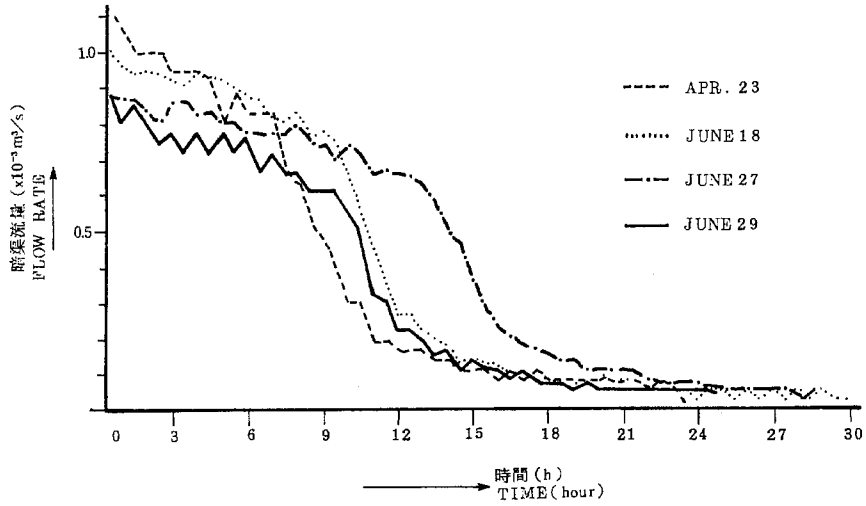


図-12 降雨排水時の暗渠流量の遞減特性
Recession curves of pipe drainage discharge by rainfall from the test field

表-5 試験圃場における暗渠流量遞減曲線の関数同定
Table 5 Identification of function for recession curves of the pipe drainage flow from the test field

		APRIL 23	JUN 18	JUN 27	JUN29	PIPE DRAINAGE TEST
LINEAR DECREASE	$Q=at+b$					
	a	-1.15×10^{-9}	-6.69×10^{-9}	-5.34×10^{-9}	-7.26×10^{-9}	-8.61×10^{-9}
	b	1.09×10^{-3}	1.01×10^{-3}	9.03×10^{-4}	8.65×10^{-4}	1.08×10^{-3}
	$A_w(m^2)$	73.8	108.9	109.1	73.6	96.0
	ERROR	8.39×10^{-10}	5.28×10^{-10}	4.58×10^{-10}	1.08×10^{-9}	7.61×10^{-10}
EXPONENTIAL DECREASE	$Q=(at+b)^{-2}$					
	a	1.67×10^{-3}	2.06×10^{-3}	2.11×10^{-3}	1.88×10^{-3}	2.36×10^{-3}
	b	3.72×10^{-1}	3.55×10^{-1}	3.70×10^{-1}	4.55×10^{-1}	3.28×10^{-1}
	$K(cm/s)$	6.32×10^{-2}	6.94×10^{-2}	6.38×10^{-2}	4.22×10^{-2}	8.13×10^{-2}
	$F_e(\%)$	0.025	0.021	0.020	0.018	0.020
	ERROR	4.22×10^{-9}	4.45×10^{-9}	6.78×10^{-9}	1.72×10^{-9}	8.45×10^{-9}

A_w : Area of water surface in the field
 K : Estimated hydraulic conductivity
 F_e : Estimated effective porosity
 ERROR : (calculated value - measured value)²/number of data

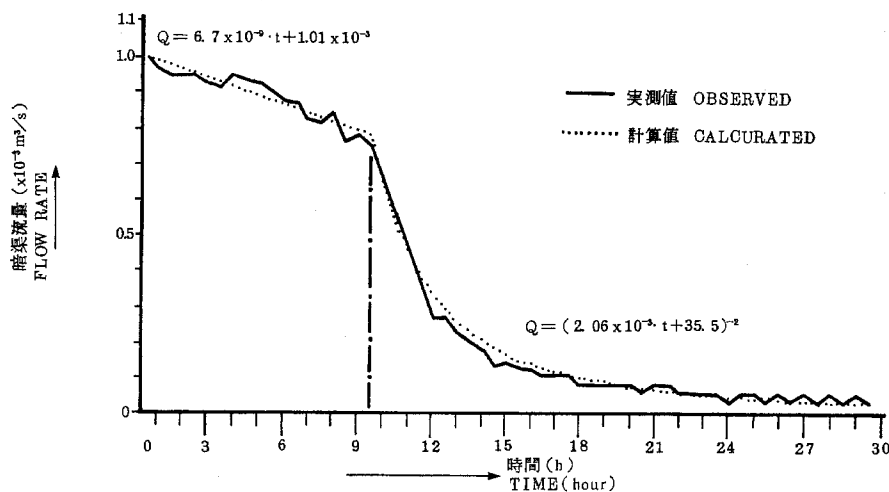


図-13 降雨による暗渠流量遞減曲線の実測値と計算値の比較 (1985年6月18日データ)
Comparison between calculated and observed recession curve
of pipe drainage discharge by rainfall (1985 June 18)

A_w , F_e , K などの係数値は暗渠排水試験の時と大きな差はなく, (3), (13)式で表わされる圃場内の水移動は自然降雨の場合も十分再現性があり, 圃場内に生じる水移動現象を十分な精度で説明しているといえる。

7. まとめ

本報告では, 圃場における水移動に果たす亀裂などの大孔隙の役割の定量的な表現方法を確立するために, 亀裂が発達した粘土質圃場での排水時の水移動現象に着目し, 圃場における水移動メカニズムを解明した。このために, 対象圃場の状態や降雨排水の実態を調査することによって心土亀裂などの大孔隙の存在状態と排水時のその役割を特定し, それを伝える水の流れの物理的特性を不攪乱土壌ブロックを用いた実験により明らかにした。さらに, 圃場全体からみた水移動現象の物理的特性を暗渠流量の遞減特性から明確にし, これに大孔隙の特性がどのように反映しているかを検討することにより, 圃場の水移動に果たす大孔隙の役割のモデル化をおこなった。この結果, 圃場における水移動に関して次のようなことがわかった。

- ① 試験圃場内の水移動は, 圃場内水位の高低によって二つのメカニズムにより生じている。
- ② 圃場内水位が高い場合には, 弾丸暗渠が水みちとして機能し, 極めて迅速な水移動が生じる。この結

果, 暗渠流量は時間に比例して低下し, タンク底に設けた小オリフィスからの流出の際にみられる流出特性と同様な特性を示す。

- ③ 圃場内水位が低い場合には, 心土亀裂のみを伝わり水が移動し, この時の水の流れはダルシー流となる。なお, この場合の透水係数は 10^{-2} cm/sオーダーとなる。

本報告で検討した成果は, 一試験圃場内での現象をモデル化したものに過ぎないが, 亀裂などの大孔隙を伝える水の流れ方の物理的特性については, かなり正確に表現し得たものと考ええる。しかしながら, 亀裂などの大孔隙を伝える水の流れ方のより詳細な特性, マトリックスと大孔隙の相互作用など明らかにできなかった問題が残存しており, モデルを一般化するためには, 今後こうした諸問題を解決していく必要がある。

謝 辞

この報告は, 土壌物理研究会シンポジウムで発表した内容を整理したものであり, シンポジウムにおいて発表の機会を与えていただいた土壌物理研究会事務局各位に感謝の意を表します。また, 本研究の遂行に当たって, 常に温かい御指導, 御鞭撻いただいた岩田進午博士(茨城大学), 長谷川周一博士(農業環境技術研究所), 宮崎毅博士(東京大学), 粕淵辰昭博士(北海道農業試験

場)の各氏には心から謝意を表します。

なお、本報告は、農林水産省の「転換畑を主体とする高度畑作技術の確立に関する総合的開発研究」において得られたデータの一部を使用した。

引用文献

- 1) Dumn, L. D. : Drain spacing formula, Agric. Eng., 35, 726-730 (1954)
- 2) 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, 51-59 (1988)
- 3) 井上久義: 亀裂が発達した粘土質圃場における暗渠排水特性, 農土論集, 137, 25-33 (1988)
- 4) Marsh, B. a · B. : Measurement of length in random arrangement of lines, J. App. Ecol., 8, 265-267 (1971)
- 5) Newman, E. I. : A method of estimating the total length of root, J. App. Ecol., 3, 139-145 (1966)
- 6) 長堀金造・高橋強・天谷孝夫: 埋設深さによる暗渠の排水特性—笠岡湾干拓干陸ヘドロ地の農地基盤整備に関する基礎的研究(IV) —, 農土論集, 57, 1-7 (1975)
- 7) 長堀金造・高橋強・天谷孝夫: 非定常状態における暗渠排水特性—笠岡湾干拓干陸ヘドロ地の農地基盤整備に関する基礎的研究(VI) —, 農土論集, 60, 1-6 (1975)
- 8) 山崎不二夫・八幡敏雄・竹中肇・田淵俊雄: 北海道小向の暗渠排水における心土亀裂の役割, 農土研究, 30, 427-434 (1963)

Summary

In this paper, following aspects are discussed so as to describe quantitatively the role of cracks on water movement in a clayey agricultural field with shrinkage cracks.

- (1) Hydrological properties of drainage according with rainfall events.
- (2) Quantitative estimation of the cracks which developed in the field.
- (3) Physical properties and routes of water flow through an undisturbed soil block (1.5m×5.0m).
- (4) Physical properties of water flow in the entire field estimated by recession curve of drain flow.

A test field was 30m×70m in area and has a impervious plastic sheet at 0.7m deep. A drain pipe, 60mm in diameter and 70m long was installed on the sheet and mole drains, 100mm in diameter, were constructed at about 0.35m deep and at 1.2m spacing. Soil texture was heavy clay (48%). Soil profile was able to be divided into two layers, plowed layer (about 0.1m thick) and subsoil. The subsoil had large prismatic structure due to shrinkage cracks penetrating to the bottom of the field. Matrix of the subsoil showed a massive structure and saturated hydraulic conductivity was no more than the order of 10^{-6} to 10^{-7} cm/s. Results of the experiments are as follows.

- (1) Most of rain water was drained from the field by pipe drainage. The pipe drainage started soon after beginning of rainfall, and the drain flow responded quickly on the rainfall patterns.
- (2) In the subsoil of the field, cracks 1-2mm wide developed and the length of the cracks on horizontal sections was $20\text{m}/\text{m}^2$ at the depth shallower than the mole drains and $10\text{m}/\text{m}^2$ at the depth deeper than the mole drains. From these value, volume of the cracks could be estimated 1.5-3 % of the volume of entire field, and 1-2 % of the volume of the field deeper than 35cm.
- (3) Experiment by using the undisturbed soil block showed that water flowed only along the mole drains and cracks. When the water table was high and water flowed mainly along mole drains, rapid and non-Darcian flow occurred. On the other hand, when the water table was low and water flowed along only cracks, the flow showed Darcian property and the hydraulic conductivity was in the order of $10^{-2}\text{cm}/\text{s}$.
- (4) Recession curve of the flow of the pipe drainage could be divided in to 2 parts. When water table was high, flow rate of the pipe drainage decreased linearly with time. This was similar

to flow property from an orifice of a water tank, and was interpreted by rapid flow along the mole drains. On the other hand, when water table was low and water flows along the cracks, the flow rate decreased exponentially with time. This could be described very well by the equation of unsteady Darcy flow, and volume of the cracks and hydraulic conductivity was calculated 2% and in the order of 10^{-2} cm/s respectively.

From these results, it can be said that most of water flowed only along the mole drains and the crack in this clayey field, and that when the water flows along the cracks, the flow showed Darcian property and the hydraulic conductivity was in the order of 10^{-2} cm/s.

(Soil phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 59, 35-51, 1989)