

暗渠排水における地下水位低下と排水時間に関する研究

第6報 暗渠排水の設計

磯島 義一

Studies on Ground Water Movement by Drainage of Sub-surface Water

(6) Design of drainage

Yoshikazu ISOJIMA

はじめに

かつて著者が初めてこの業務に携わったころ、研究課題は土壌類型による暗渠の深さと間隔であった。米の在庫が多くなって、生産調整を行なっていたところである。

試験地^{2, 5)}は農業技術センターから約15 km離れた一志郡白山町地内で、圃場の地下水調査を行った。圃場整備された1筆30アールの区画に、暗渠排水の工事を行い、多いときで5筆は調査地とした。作物は小麦と飼料作物のソルガムを栽培した。

土壌は細粒黄色土と呼ばれる洪積台地土壌で、所により湧水があった。雲出川を25 kmほど溯ると現地に到着する。現地が近くなるに従って川は岩肌を露出し川底は一面の岩となる景観である。

降雨による雨水は圃場の土壌の間隙に入り貯留される。土壌の間隙は耕起することによって生ずる。その深さは普通20 cm程度である。

耕作土の間隙に貯留された雨水は組合せ暗渠（弾丸暗渠と管暗渠と組合せたもの）を通じて、出口の排水路に放水される。

耕作土の下にある土壌（心土）は大部分の土壌間隙が毛管水で飽和されており、暗渠で排水できる水は極めて少ない。

地下50 cmから60 cm位のところに砂礫などの透水層が見れることがある。この場合砂礫の間隙を流れる地下水は、毛管現象で上昇して土壌を湿潤にする。砂礫層に暗渠を敷設すれば、土壌は過湿から程良い湿潤に改良される。このような土層は各地に見られる。

地下40～50 cmに岩盤がある場合、これより下に地下水は滲透せず、これより上の土壌は湿潤状態となる。こ

の場合暗渠は岩盤上に敷設する。

地下の排水については土層の条件によって対策は異なる。暗渠排水は地下水を放水する出口が必要である。その出口が排水路である。排水路底は一般に田面より60 cm程度下った所を敷高としている。排水路底より低いところに砂や砂利などの透水層がある場合は、管暗渠でもっと下流の出口まで地下水を運ばなければならない。

本論文では、土壌の試験を行い排水に要する時間を考察したものである。

結論的に言えば、外部から地下水の侵入がなければ組合せ暗渠で排水をはかり、乾田化を促すことである。作土層の下の心土は毛管水で飽和され暗渠で排水できる水は極めて少ない。しかしながら作土層から排水されると上からの水の供給がなくなり、心土層も過湿ではなくなる。

実験材料及び研究方法

実験材料

農業技術センター裏山から産出する山砂と勝田試験地の耕作土壌を実験材料とした。

実験方法

山砂は網目0.105, 0.210, 0.250, 0.500 mmの篩に留まったものを、耕作土壌は網目2 mmを通過したものを実験材料とした。

透水試験は網目0.105 mmの篩に実験材料を入れて変水位の試験を行う。実験材料の入った篩を水没させて、その後引きあげ、実験材料の上にある水が空になる時間を測定した。

透水係数を k とすると

$$k = \frac{h}{t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

但し h : 実験材料の厚さ cm
 h_1 : 最初の水圧 4.5 cm
 h_2 : 落水後の水圧 cm
 t : 水の落下時間 sec

重力水の間隙率の試験は第2図のとおり、縦8 cm、横9 cm、高さ12 cmの水槽を作り、底に内径5 mmの排水管を取りつける。水槽の底面に1 mm網目の網と布を敷いて濾過材料とした。

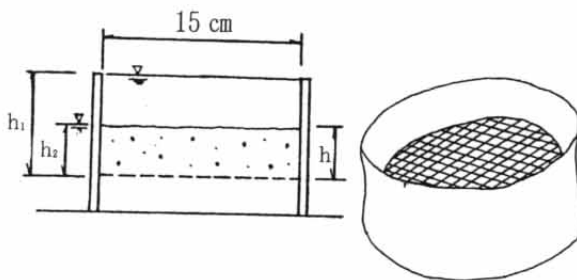
水槽に材料を入れ、材料の間隙を水で飽和させた後、自然落下する水の量を測定する。重力水の間隙率は実験材料の間隙から自然排水する水に対する、間隙の水を含んだ材料との体積比で表した。

研究方法

圃場の作土層に貯留された雨水が暗渠で排水されるとき、地下水位の時間的な推移を考察する。

実験結果

実験の結果は第1表の通りである。ここで0.105から0.210の細砂とは、0.210の篩を通過し、0.105の篩に留まるものである。有効間隙率は、重力水に対する重力



第1図 篩による透水試験

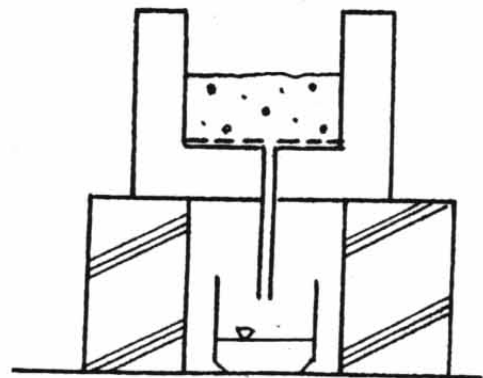
水を含む土壌全体の体積比で表す。重力水とは自然に試料中の水が土粒子の間隙を上から下へ流れ、外部へ出てその体積に相当するものが、土壌の中で空気と置換するものである。

第1表のとおり、0.210の篩を通過し0.105の篩に留まる土壌については、透水係数は0.012 cm/sであるが、有効間隙率は0となる。有効間隙率が0とは、土粒子の間隙を満たしている水は毛管水のみで、自然に排水できる水はない。

第1図に示すように、土壌の上部に水圧がかかるとき、毛管水は上から下へ移動できるが、上部の水圧 ($h_1 - h_2$) がなくなると移動は停止し、土壌の間隙は毛管水で飽和する。

以上の実験から耕作土壌の下にある心土については、土壌の間隙の大部分は毛管水で満たされており、外部へ自然排水できる水は極めて乏しい。

耕やされた土壌については心土とは少し異なる性質がある。2 mmの篩を通過した耕作土については、透水係数が 2.9×10^{-3} cm/s であっても、有効間隙率は5.5%もある。この土壌について、暗渠排水されるとき、地下水位の低下と排水時間について考察する。



第2図 重力水の間隙の試験

第1表 土壌の粒径と透水係数、有効空隙率

採取地	粒 径	透 水 係 数	有 効 間 隙 率	備 考
	mm	cm/s	%	
農業技術 センター	0.105~0.210	0.012	0	細 砂
裏 山	0.210~0.250	0.046	2.2	粗 砂
	0.250~0.500	0.068	4.0	〃
	0.500~1.000	0.072	6.5	〃
玉城町内 試 験 地	2 mmの篩を通過する耕作土壌	cm/s 2.9×10^{-3}	% 5.5	粗砂~ シルト粘土

考 察

1. 土壌と地下水

土壌は土粒子、水、空気から構成される。土粒子は2 mmの篩に止まるものを礫、2 mmの篩を通過して0.2 mmの篩に止まるものを粗砂、0.2 mmの篩を通過して0.02 mmの篩に止まるものを細砂、0.02 mmを通過して0.002 mmの篩に止まるものをシルト、0.002 mmを通過するものを粘土と呼んでいる。

土粒子と土粒子の間隙に水と空気が存在する。水は土粒子の周囲に附着して動かない吸湿水、土粒子の間隙を下から上に移動できる毛管水、重力の作用によって上から下へ移動できる重力水に分類できる。

重力水は暗渠で排水できる。毛管水の一部分は上部から圧力をかけると、上から下へ移動する。

水は空気に接すると表面張力が働く。土粒子の間隙を毛管と考えれば、毛管の直径をd、表面張力の強さをT (単位はgr/cm) とすると、毛管力は $\pi \times d \times T$ である。毛管上昇する水柱の高さをhとすれば、重力と毛管力との釣合より¹⁾

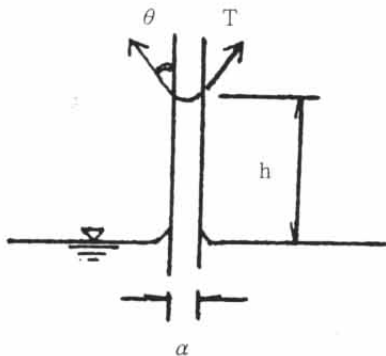
$$\rho g h \times \frac{\pi d^2}{4} - \pi d T \cos \theta = 0$$

$$h = \frac{4 T \cos \theta}{\rho g d} \quad (2)$$

但し水と土粒子の接触角を θ とすると θ は 10° 程度の数値である。 ρg は水の単位体積当りの重量で、 1 g/cm^3 である。

毛管上昇高hは毛管直径dに反比例する。毛管の直径により毛管上昇高は決定する。毛管高さhより高い土層があり、毛管の中へ雨水が一杯入る場合、毛管直径dに相当する毛管高さhまで水柱は下降する。隣接地の圃場と当該圃場に高低差がある場合、毛管内の水は上から下へ移動する。

実際の土壌については、間隙は円形ではない。事例によると間隙率はロームでは55%、シルトロームでは45



第3図 毛管上昇高

%である。第4図に示したように(a)の並び方では、間隙率は47.6%、(b)の並び方では25.9%である。従って実際の土壌は(a)に近い並び方をしている。この並び方で毛管上昇hを計算する。一辺の長さがaの立方体に直径aの球を入れると、その間隙は

$$a^3 - \frac{\pi a^3}{6} = 0.476 a^3$$

である。この立方体を縦にn個積みあげる。この空隙を水で満たすと、その水柱重量は

$$\rho g n \times 0.476 a^3$$

この水柱を引きあげる力は毛管力である。その毛管力は水の表面張力の強さをT (0.075gr/cm) とすると、

$$\pi a T \cos \theta$$

である。但し θ は土粒子と水柱との接触角(10°)である。水柱の重量と毛管力とは釣合うのでその毛管高さhは

$$h = n a = \frac{1}{\rho g} \times \frac{\pi \cos \theta}{0.476} \frac{T}{a} \quad (3)$$

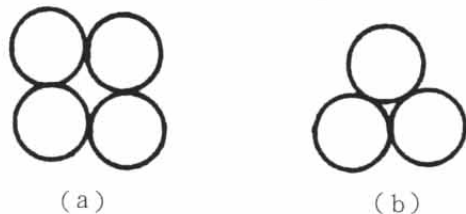
$$= \frac{0.48}{a} \text{ (cm単位)}$$

但し、 ρg は水の単位体積重量で 1 gr/cm^3 である。例えば0.210 mmの篩を通過して0.105 mmの篩に留まる細砂については32 cm水が上昇することになる。

今回行った実験は第1表に示すとおり重力水が土壌の中に体積比で何パーセントあるかを示したものである。実験の結果によると細砂(粒径0.105~0.210 mm)になると重力水はなく、全部毛管水である。

このことは最も重要な事であり、水田の土壌は大部分が毛管水である。粒度試験の事例によると壤土では80%が細砂以下の土粒子から構成されている。粗砂と礫と合せて20%を占めるが、これら細砂の中に入ってしまうので、ほとんど大部分が毛管水で、暗渠で排水できる重力水は、ほとんどない。

以上の土壌は耕やされたことのない心土の性質を表わしたものである。耕作土については一事例であるが、今回の実験によると体積比で5.5%も重力水がある。この水は暗渠で排水できる水である。耕作土に入っている重力水の排水は弾丸暗渠が適している。弾丸暗渠から排水管暗渠で放水口まで導水する組合せ暗渠も排水効果がある。



第4図 土粒子の並び方

2. 暗渠排水の配列

富田⁴⁾は暗渠排水を合理的に配列し、水の浸入する方向に直角に暗渠を設置すべきであること、暗渠の数及び暗渠と暗渠の間隔が施工地の土質と湧水量、並びに暗渠の深さによって定めるべきであると考えた。それによると一番渠は崖下4～5尺（1.2～1.5 m）のところに設け、二番渠は2～3間（3.6～5.4 m）、3番渠以下は各4～5間（7.2～9.0 m）とし、砂土地ならば7～8間（12.6～14.4 m）、粗砂地ならば10間（18.0 m）位にする。若し高低が少なく深さ4尺（1.2 m）以内にするならば、その深さに応じて暗渠を近くにしなければならない（第5、6、7、8図）。

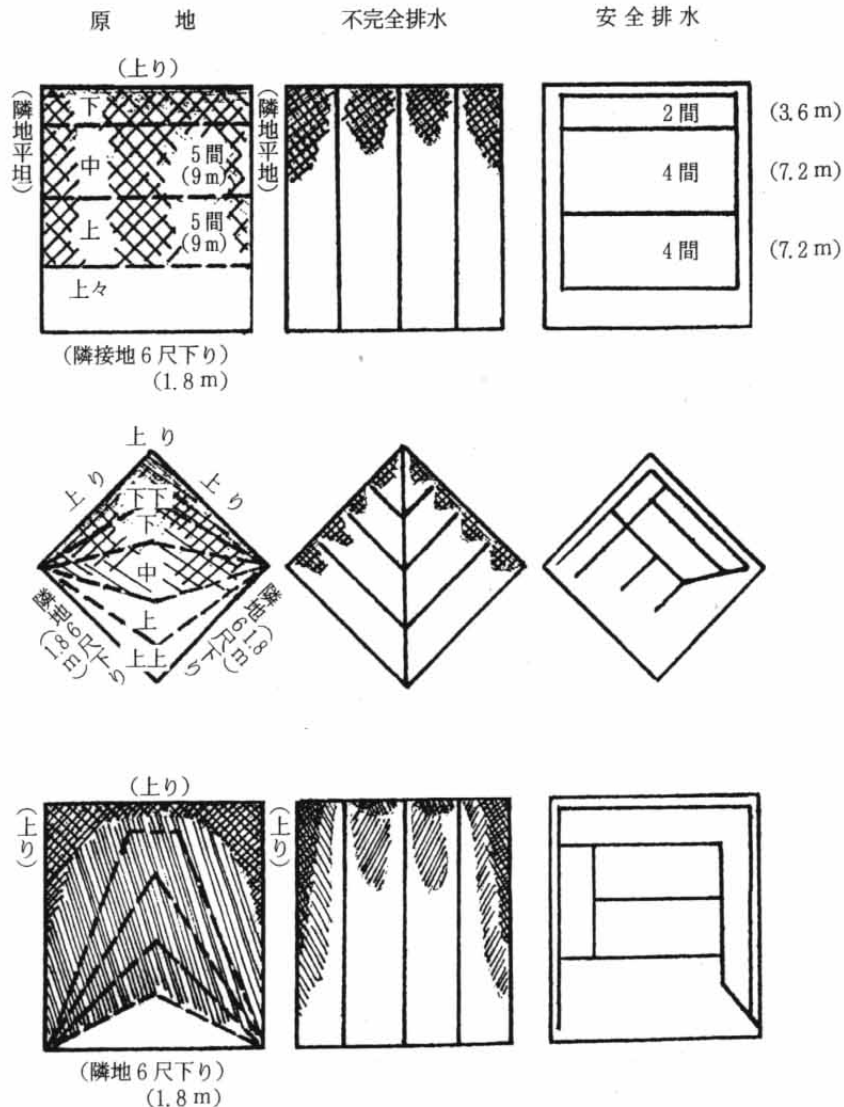
第5図は富田が設計した山間地で湧水のある暗渠の設計事例であり、第6図は平坦地の設計事例である。この事例の断面図を第7、8図に示す。

第7図は中山間地に見られる例であり、当時は圃場整備もなされていなかったことから、自然の雨水は田越し

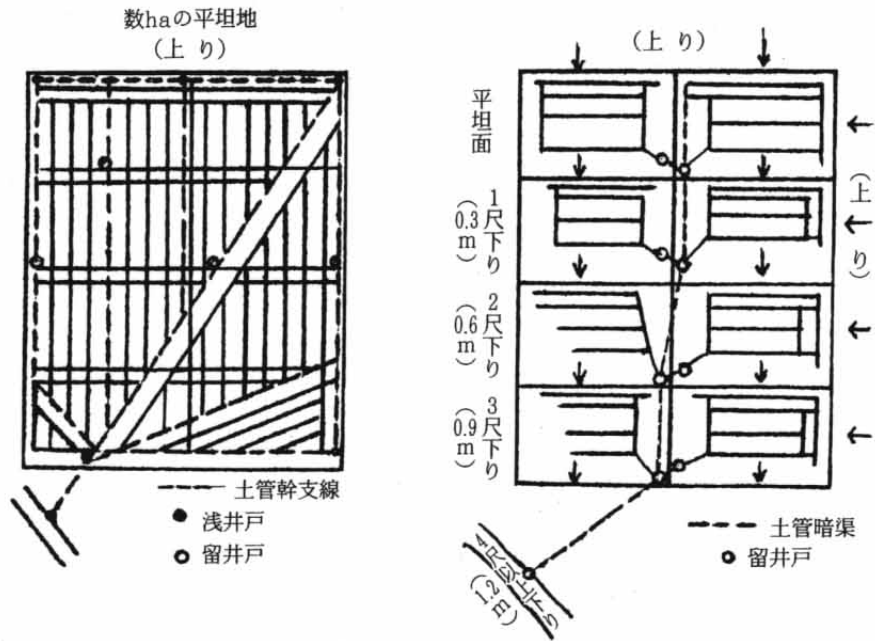
に標高の高い水田から低い水田へ排水されていたので、法尻附近は湿っていたものと思われる。例えば隣接地との高低差が30 cm程度でも暗渠からの排水量は第7図の（イ）が最も多い。以上のおり隣接地に高低差があれば、地下水は高い所から低い所へ流れるので、法尻附近が湿ってくる。そのときは先ずその位置に暗渠を設置する。

次に第8図に示すように、地下50～60 cm附近に砂礫などの透水層のある場合である。地下水に水圧があれば湧水として地上に吹きだし、圃場を水浸しにすることがある。水圧がない場合でも、毛管現象で水は上昇して土壌を過剰に湿らせることがある。この透水層は川が運んできたもの、川から洪水のときあふれたもの、或いは母岩が風化途中のものなどである。この場合は透水層の中に暗渠を敷設する。その間隔は農林水産省の設計基準に示されているので省略する。

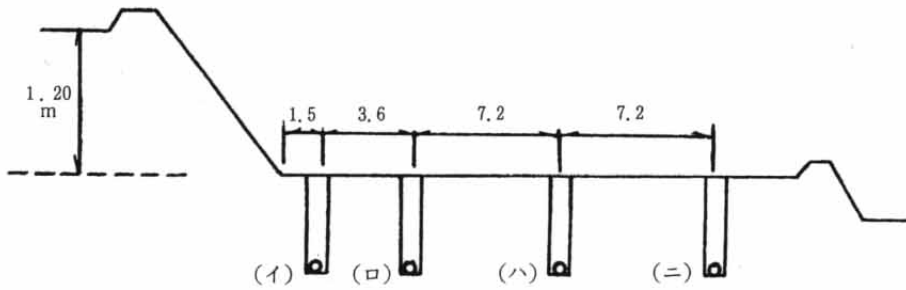
第9図は作土層の直下に弾丸暗渠を施工した事例であ



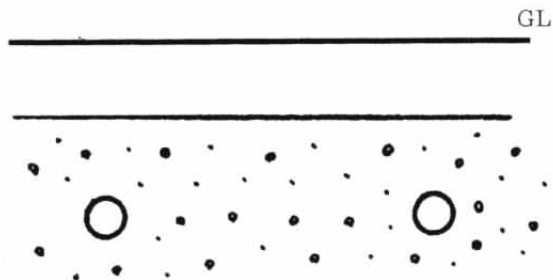
第5図 暗渠の配列



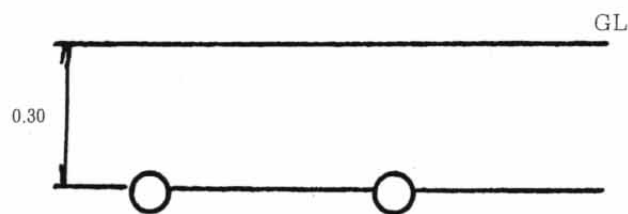
第6図 暗渠排水の設計事例



第7図 第5図(上右側)平面図の断面



第8図 砂礫など透水層に設けた暗渠



第9図 耕作土直下に設けた弾丸暗渠

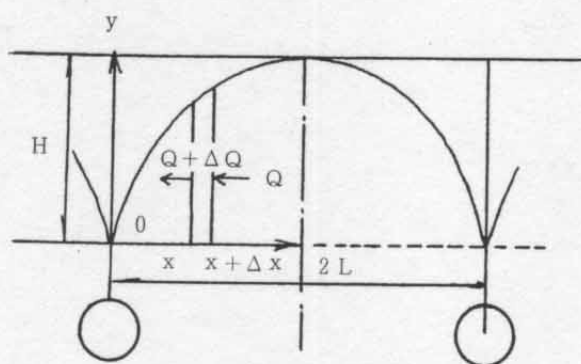
る。水田転作する場合、作土層の間に貯留した雨水を弾丸暗渠で排水する事例である。作土直下の心土は第1表の実験で示した通り暗渠で排水できる水は極めて少ない。耕作土中の水を排水すれば、心土は水の供給源が断たれるので、過湿にはならない。通常は弾丸暗渠で吸水した水を、管理設暗渠で吐出口まで導水する。

3. 暗渠排水の設計

水田転作畑では降雨終了後1日程度で排水が大部分終了することが望ましい。雨が数日間降り続いて生産途中のサツマイモが食用にならなかった例がある。耕作土直下に施工した弾丸暗渠からの排水について考察する。

設計条件として、耕作土には体積比で5.5%の重力水（暗渠で排水できる水）があり、その直下の心土は毛管水のみである。暗渠は深さH、間隔2Lで設置する。深さHの土壌の有効間隙に、飽和状態が入っていた重力水が、時間と共に暗渠から排水する推移を考察する³⁾。

原点を耕作土層の底にとり、水平方向にx軸、鉛直方向をy軸とする。第10図に示すとおりxにおける断面とそれよりΔxだけ離れたx+Δxにおける断面を考える。



第10図 暗渠の断面図

Δt時間内に、任意の位置x+Δxの断面に入る地下水はQ×Δtであり、xの断面から出ていく地下水は(Q+ΔQ)×Δtである。xとx+Δxに囲まれた微小部分に残る水は

$$Q \Delta t - (Q + \Delta Q) \Delta t = -\Delta Q \cdot \Delta t$$

である。同じ微小部分の中で、Δt時間にΔyだけ地下水位が低下するので、その水の量は土壌の有効間隙率をαとすると-αΔx・Δyである。両者は等しいから

$$\Delta Q \cdot \Delta t = \alpha \Delta x \cdot \Delta y \quad (4)$$

地下水の流量Qはダルシーの法則より

$$Q = k \frac{\Delta y}{\Delta x} y \quad (5)$$

Δをdと書き替え、dQは微分の方法より

$$\begin{aligned} dQ &= k d \left(\frac{dy}{dx} y \right) \\ &= k \left\{ y \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \partial x + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \partial x \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

(6)式を(4)式に代入すると

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{k}{\alpha} \left\{ y \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

(7)式は地下水位の時間的な推移を表す微分方程式である。

地下水位yは、地下水位の形状を表す関数X(x)と、

時間の関数T(t)の積で表すと

$$y = X(x) T(t) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} &= T \frac{d^2 X}{dx^2}, \quad \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \\ &= T^2 \left(\frac{dX}{dx} \right)^2, \quad \frac{\partial y}{\partial t} = X \frac{dT}{dt} \quad (9) \end{aligned}$$

(9)式を(7)式に代入すると

$$X \frac{dT}{dt} = \frac{k}{\alpha} \left\{ X T \cdot T \frac{d^2 X}{dx^2} + T^2 \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 \right\}$$

$$\frac{\alpha}{k} \frac{1}{T^2} \frac{dT}{dt} = \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{X} \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 \quad (10)$$

(10)式の左辺はtのみの関数、右辺はxのみの関数である。この式が常に成立するためには、各辺は定数でなければならない。この定数を-βとおけば

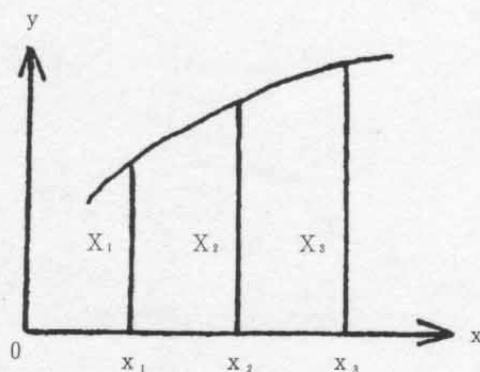
$$\frac{\alpha}{k} \frac{1}{T^2} \frac{dT}{dt} = -\beta \quad (11)$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{X} \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 + \beta = 0 \quad (12)$$

但しkは土壌の透水係数である。(11)式を積分すると

$$T = \frac{1}{\frac{\beta k t}{\alpha} + 1} \quad (13)$$

積分定数はt=0のときT=1として決定した。



第11図 地下水位の形状

(12)式は地下水位の形状を表す微分方程式である。数値計算で地下水位の形状を求めることにする。

$$\frac{dX}{dx} = \frac{\frac{X_3 - X_2}{x_3 - x_2} + \frac{X_2 - X_1}{x_2 - x_1}}{2}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{X_3 - X_1}{x_2 - x_1} \quad (14)$$

$$\frac{d^2X}{dx^2} = \frac{\frac{X_3 - X_2}{x_3 - x_2} - \frac{X_2 - X_1}{x_2 - x_1}}{x_3 - x_2}$$

$$= \frac{X_3 - 2X_2 + X_1}{(x_2 - x_1)^2} \quad (15)$$

但し $x_2 - x_1 = x_3 - x_2$ とする。

(14), (15)式を(12)式に代入すると

$$\frac{X_3 - 2X_2 + X_1}{(x_2 - x_1)^2} + \frac{1}{X_2} \left(\frac{1}{2} \frac{X_3 - X_1}{x_2 - x_1} \right)^2 + \beta = 0 \quad (16)$$

(16)式の両辺に $4X_2(x_2 - x_1)^2$ を掛けて整理すると

$$X_1^2 + 2(2X_2 - X_3)X_1 - 8X_2^2 + 4X_2X_3 + X_3^2 + 4\beta(x_2 - x_1)^2X_2 = 0$$

上記は X_1 についての2次方程式である。 X_1 について解くと

$$X_1 = -2X_2 + X_3 + 2\sqrt{3X_2^2 - 2X_2X_3 - \beta(x_2 - x_1)^2X_2} \quad (17)$$

両辺をHで割ると

$$\frac{X_1}{H} = -2\frac{X_2}{H} + \frac{X_3}{H} + 2\sqrt{3\left(\frac{X_2}{H}\right)^2 - 2\left(\frac{X_2}{H}\right)\left(\frac{X_3}{H}\right) - \frac{L^2}{H}\beta\left(\frac{x_2 - x_1}{L}\right)^2\frac{X_2}{H}}$$

ここで

$$\frac{X_1}{H} = p, \quad \frac{X_2}{H} = q, \quad \frac{X_3}{H} = r \quad (18)$$

と書き替え積分定数

$$\beta = \frac{nH}{L^2} \quad (19)$$

とすると

$$p = -2q + r + 2\sqrt{3q^2 + 2qr - n\left(\frac{x_2 - x_1}{L}\right)^2q} \quad (20)$$

(19)式を(13)式に代入すると

$$T = \frac{1}{\frac{nkHt}{\alpha L^2} + 1} \quad (21)$$

(20)式を(8)式に代入すると、地下水位 Y は

$$Y = \frac{X(x)}{\frac{nkH}{\alpha L^2}t + 1} \quad (22)$$

(22)式は地下水位の時間的な推移を表す関係式である。分子の $X(x)$ は地下水位の形状を表し、分母は時間的な推移を表すものである。地下水位は(20)式から求める数値に(18)式よりHを掛けたものが $X(x)$ となる。

次に地下水位の形状を求める。その初期条件は第10図に示すとおり暗渠の中央で $Y=H$ とし、暗渠の位置で Y は0に近い数値とする。その位置及び地下水位は、それぞれL、及びHで割ったノーディメンションとする。

(20)式から計算した結果は第2表のとおりである。暗渠間隔の半分の長さLは10等分した。 $n=1$ とした。

地下水位が満水位、即ち x がどの位置でも $Y=H$ のときから、第10図に示す地下水位になるまでの間、地下水位の時間的な水位を考察する。

その方法は(20)式において、 $L=2(x_2 - x_1)$ の場合 $r=1$ 、 $q=0.990$ と仮定して $p=0.708$ を得る。 q の値を0.990としたのは比較的水平和とみなしたからである。地下水位は1から0.990に低下し、次に0.708に低下する。次に $L=3(x_2 - x_1)$ の場合を計算する。このように順次計算を行った結果は第3表の通りである。

第12図は地下水で飽和した土壤が暗渠で排水が行われて、地下水位が低下する形状を表す。この形状より先は(1)式の法則に従って減衰する。

設計事例として、次の場合の排水日数を計算する。

- 耕作土層の厚さ $H=0.20$ m
- 耕作土の透水係数 $k=2.9 \times 10^{-3}$ cm/s
- 耕作土の有効間隙率 $\alpha=5.5\%$
- 弾丸暗渠の深さ0.30 m、間隙2.0 m
- 耕作土層の下の心土は不透水層(透水係数が $1 \times$

第2表 地下水位の形状(1)

$\frac{x_2 - x_1}{L}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\frac{X}{H}$	1.000	0.990	0.969	0.937	0.893	0.836	0.764	0.673	0.555	0.391	0.060

10^{-5} cm/s 以下) とする。

第2, 3表より $H=0.20$ をかけて地下水位の形状を計算する。それに有効間隙率をかけて地下水量を算出する。一方地下水面形より排水能力を算出すれば、排水日数を知ることができる。

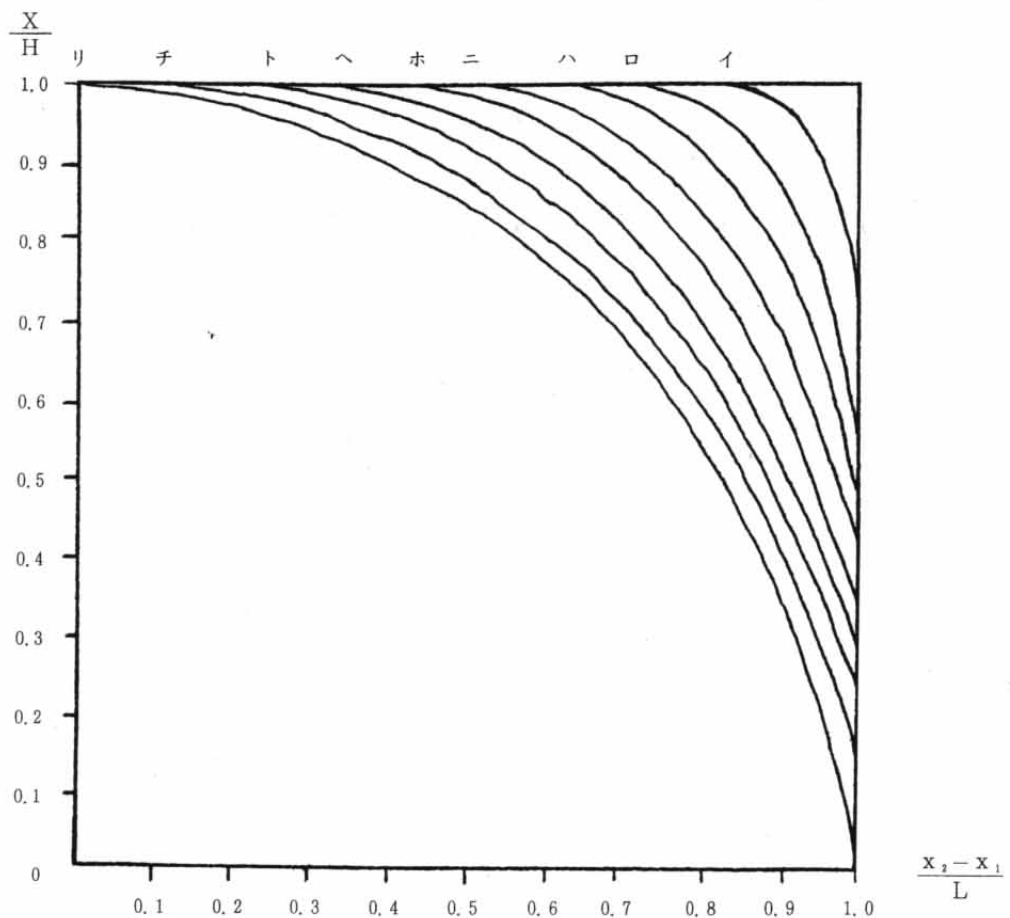
第12図のイからリまで排水に要する時間は30分弱で

あり、土壌の間隙が満水状態から第10図のような地下水位になる。

暗渠から排水が行われて、第10図に示す地下水位が時刻の経過と共にどのように低下するかを考察する。水位の低減する係数は別式より求めることができる。この式に

第3表 地下水位の形状(2)

$\frac{X_2 - X_1}{L}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
									1	0.990	0.708
								1	0.990	0.864	0.577
							1	0.990	0.915	0.763	0.489
$\frac{X}{H}$					1	0.990	0.939	0.842	0.685	0.424	
				1	0.990	0.959	0.905	0.825	0.713	0.555	0.299
		1	0.990	0.964	0.921	0.859	0.775	0.663	0.508	0.255	
	1	0.990	0.967	0.930	0.878	0.809	0.719	0.601	0.437	0.138	



第12図 地下水位の形状

$$n = 1,$$

$$k = 3 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 2.59 \text{ m/d}$$

$$H = 0.20 \text{ m}$$

$$\alpha = 0.055$$

$$L = 1 \text{ m}$$

を代入すると

$$T = \frac{1}{9.42t + 1}$$

但し t の単位は日である。計算の結果は第6表のとおりである。

降雨により、耕作土の間に溜った雨水は、1日経過すると90.5%は排水され、残り9.5%となる。この表では降雨後5日経過しても2%は溜っている。

第4表 排水能力の計算

	k	i	A	Q
	m/d		m ²	m ² /d
イ	2.59	0.56	0.170	0.246
ロ	〃	0.57	0.143	0.211
ハ	〃	0.55	0.125	0.178
ニ	〃	0.53	0.110	0.150
ホ	〃	0.52	0.096	0.129
ヘ	〃	0.51	0.085	0.112
ト	〃	0.51	0.076	0.100
チ	〃	0.60	0.057	0.088
リ	〃	0.66	0.045	0.076

第5表 排水日数の計算

	地下水量	排水能力	排水日数
	m ²	m ² /d	d
イ	0.000170	0.246	0.001
ロ	0.000227	0.211	0.001
ハ	0.000243	0.178	0.001
ニ	0.000273	0.150	0.002
ホ	0.000306	0.129	0.002
ヘ	0.000311	0.112	0.003
ト	0.000313	0.100	0.003
チ	0.000447	0.088	0.005
リ	0.000384	0.076	0.005

第6表 地下水位低下の係数

t	1日	2日	3日	4日	5日
T	0.095	0.050	0.034	0.025	0.020

しかし毛管現象で吸いあげられ、蒸発散するので、弾丸暗渠による排水は大体1日程度で完了すると考えてよい。従って弾丸暗渠の間隔を2m程度に施工しておけば、雨水の排水は十分である。

4. 暗渠排水の実際

(1) 土層と地下水

第13図は白山町で行った試験地である。1点鎖線は高低差1m毎の等高線を表す。矢印は地下水の流れの方向を示す。No.81圃場の左側の区画の境界には湧水地点があり、常時水が細砂を伴って吹き上げている。

試験地は第13、14図にあるNo.81圃場である。縦100m、横30mの区画である。暗渠は点線で示したように長さ100mを3本施工した。その断面は第14図に示した通り縦0.30m、横0.20mのモミガラのみで、排水管は排水路へ放水するまでのわずかな部分である。

弾丸暗渠はモミガラ暗渠に直交して、深さ0.35m、間隔2mで施工した。

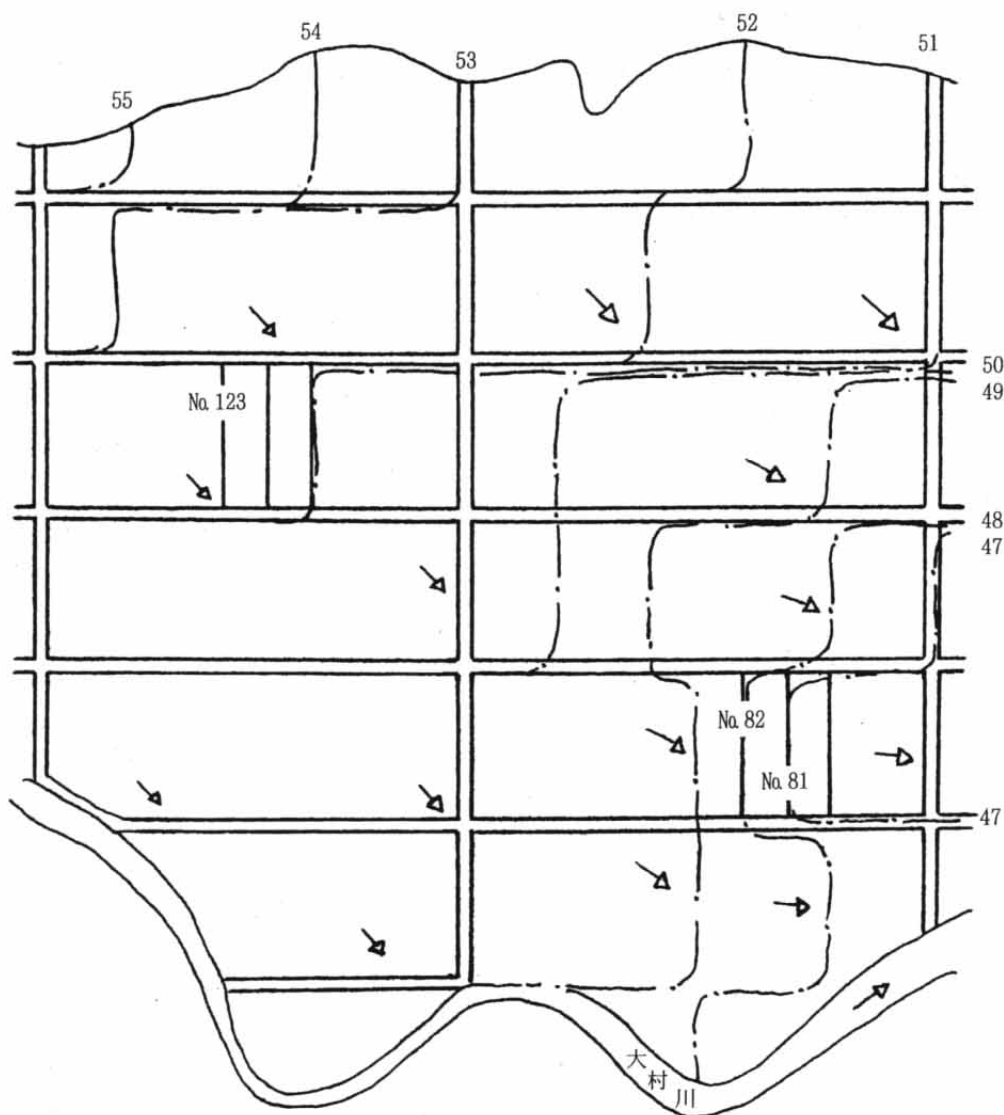
No.82圃場は暗渠未施工圃場である。第14図には土層の柱状図を示した。この位置は地下水位を観測するためにソイルオーガで掘削した場所である。掘削中に湧水があり、砂の層も見つかっている。砂は花崗岩の風化したものである。それはこの附近を流れる川は岩盤が露出していることから判断する。

地層の調査からNo.81、No.82圃場を横断する形で砂の層があり、地下水が砂の空隙を流れている。その深さは地面より80cm下った所にあり、モミガラ暗渠で地下水を補足することはできなかった。モミガラ暗渠の深さは50cmである。モミガラ暗渠は作土層の間にたまった雨水を排水する目的で施工したものである。モミガラ暗渠施工後、地下水位を測定するために、1筆の圃場に4箇所測水管を埋設した。ソイルオーガで掘削する途中で、土層や湧水をメモしたものが第14図である。

作土層の空隙に入った雨水を排水するためには、第14図で示した弾丸暗渠とモミガラ暗渠と組合せ暗渠は有益である。しかしながら砂など透水層を流れる地下水の排水は、土層の調査をして暗渠排水の計画をしなければならない。

以上は砂の層が地下80cmにあり、土層を掘削中に湧水を見ることができた事例である。しかしながら砂の層が現れなくても、土層を掘削中に湧水が現れることがあり、その事例を示す。

第15図は玉城町地内で暗渠排水試験を行なった圃場の平面図である。圃場整備前は水路が蛇行しながら縦断していた。旧川の跡から湧水が見られる。土層に明確に砂などの透水層がなくても、旧川の跡には湧水、即ち重



第13図 白山町地内の試験地

力水が現れる事例である（第16図参照）。

暗渠排水の役割は第7図から第9図までに示した。隣接地からの湧水を遮断したり、砂礫などの透水層の水を排水したり、作土層の空隙に溜っている雨水を排水するものである。

第15図の圃場で、降雨後には暗渠から排水しているが排水量の一番多い場所は、標高の高い圃場に隣接しているDの暗渠であった。

（2）地下水位

白山町地内で調査したNo. 81圃場とNo. 123圃場の地下水位²⁾は第17、18図に示すとおりである。周囲の圃場は水田作で、上記の試験圃場は小麦とソルガムを栽培した。

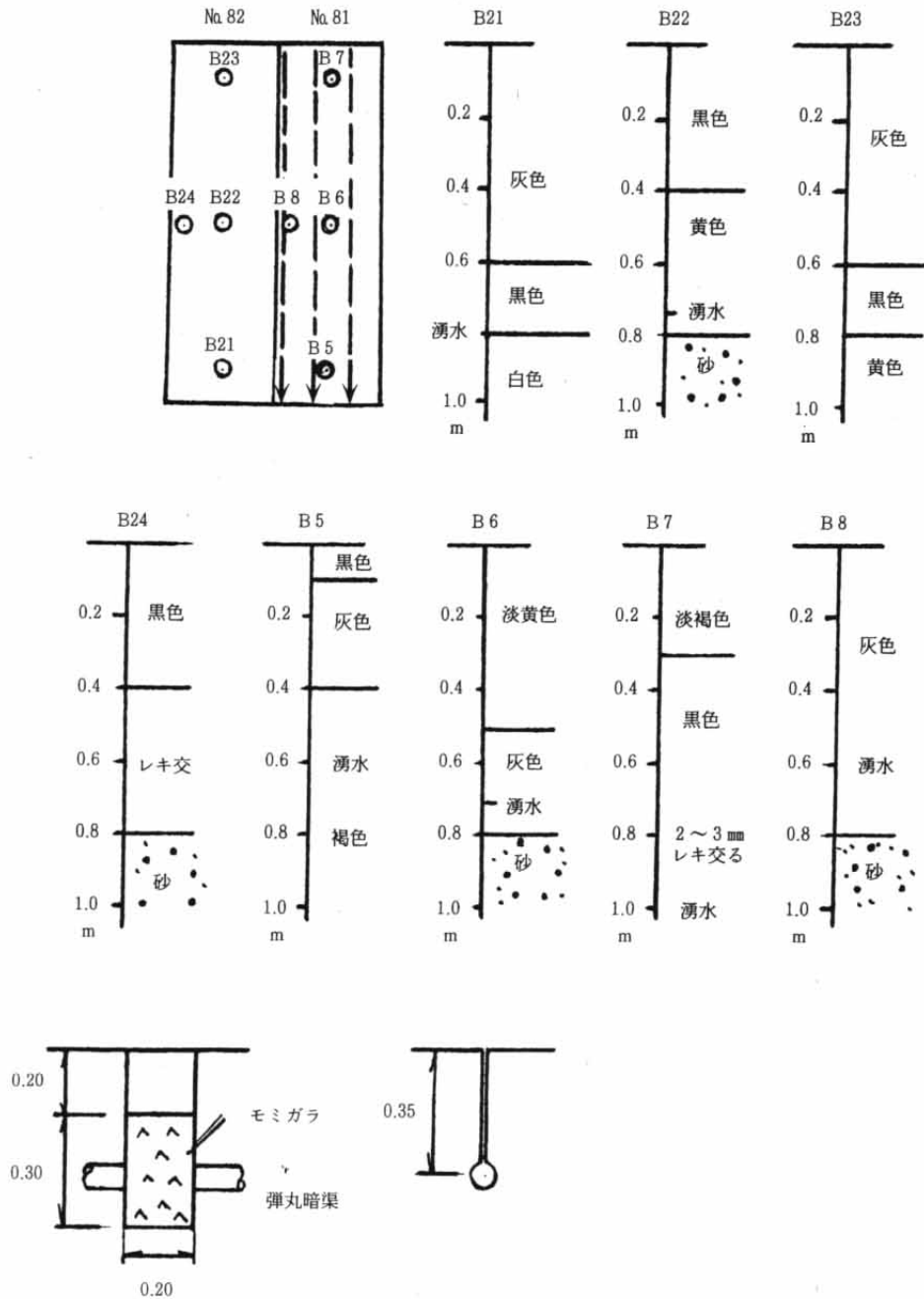
地下水位は、かんがい期は周囲の水田が入水するので

比較的高く、非かんがい期になると低下する。降雨があると上昇し、晴天が続くと下降する。

両試験地とも暗渠は組合せ暗渠を施工した。第14図に示したように弾丸暗渠は短辺方向に深さ0.35m、間隔2mで施工し、モミガラ暗渠は、これと直交する形で長辺方向に深さ0.50m、間隔10mで3本配列した。モミガラの部分は深さ0.30m、巾0.20mの断面で、排水管なしのモミガラだけのものである。弾丸暗渠で吸水した地下水をモミガラ暗渠で導水して、排水口へ放水する計画である。

（ア）No. 81圃場

第17図 B6及びB8の地下水位は、砂の間隙を流れる地下水の水圧を示すものである。砂の層は深さを0.80m以下にあり、圃場の中央附近を横断している。



第14図 圃場平面、土壌断面、暗渠断面図

第17図 B5及びB7も掘削中に湧水があったので、
 土壌の間隙を流れる水みちがあり、地下水位は地下水
 の水圧を示すものである。

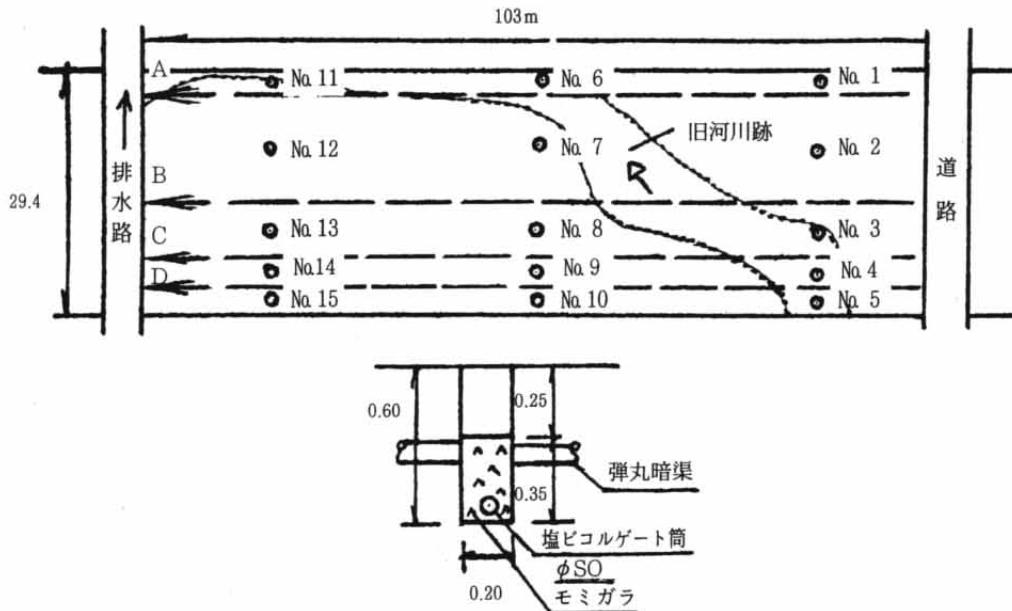
第17図 B5の地下水位が比較的低いのは排水路に近い
 影響を受けており、B7が比較的高いのは、2mも
 標高の高い隣接圃場から地下水が流入していること
 による。

小麦の収量は昭和57年(1982)は294kg/10アール
 であったが昭和58年は230kg/10アールに留まっ
 た。

(イ) No.123圃場

第18図 B18, 19, 20の地下水位は、土壌中の空隙が
 全部毛管水で飽和されている深さを示す。これより上
 は気相があり、下にはない。この水位は作物の生育や
 収量に影響を与える。小麦の収量は昭和57年(1982)
 は135kg/10アール、昭和58年は210kg/10アール
 であった。

第18図 B17の地下水位は排水路に近いので、この影
 響をうけて一番低い。かんがい期が過ぎると周囲の水
 田は落水するので、地下水位は低下する。

第15図 暗渠排水平面図及び断面図³⁾

地下1 m程度の範囲内に透水層がない場合、地下水位は土壌の間隙が毛管水で飽和している深さを表す。これ以上畑作物の根は深く伸びないので、作物の生長や収量に大きな影響を及ぼす。

地下1 m程度掘削する途中で、砂礫などの透水層が見つかった場合、それより浅い深さでもう一本観測孔を掘削するとよい。前者の地下水位は砂礫の空隙を流れる地下水の水圧を表す。後者の地下水位は作物に関係するもの、即ち毛管水で飽和する深さである。地下水位は50 cmより深いところにあることが望ましい。

(3) 弾丸暗渠と作物栽培

弾丸暗渠やモミガラ暗渠を施工した圃場で、地下水の経路を追跡した試験⁶⁾がある。バケツの底を除いた円筒形の物を土壌の中に少し差し込み、その中へ白ペンキをまぜた水を入れる。2～3日してから土壌の断面を調べたものである。

ペンキをとかした水は黒ぼく層を縦に流れ、次の粘土層で留まり、その境界を流れ弾丸暗渠に入ったことが確認された。弾丸暗渠の周辺には亀裂や植物根の跡も比較的多くて、弾丸暗渠の効果を確認することができた。

弾丸暗渠とモミガラ暗渠を施工した圃場で麦の栽培を行い、小麦の根の分布と土壌の亀裂剥離面についての報告⁵⁾がある。弾丸暗渠の周辺を調査したものが第21図で、無対策圃場と比べてはるかに根の分布が多い。なおNo. 71とNo. 123圃場は第17、18図で地下水位を調査した圃場である。

小麦の根の分布と土壌の粒径の関係について、粘土成

分が多くなると根の分布が減少する。No. 71圃場は粘土成分が20%程度である。No. 123圃場は30%近い。土壌の土粒子が細くなるにつれて土壌の亀裂や剥離面に差異が生ずる。

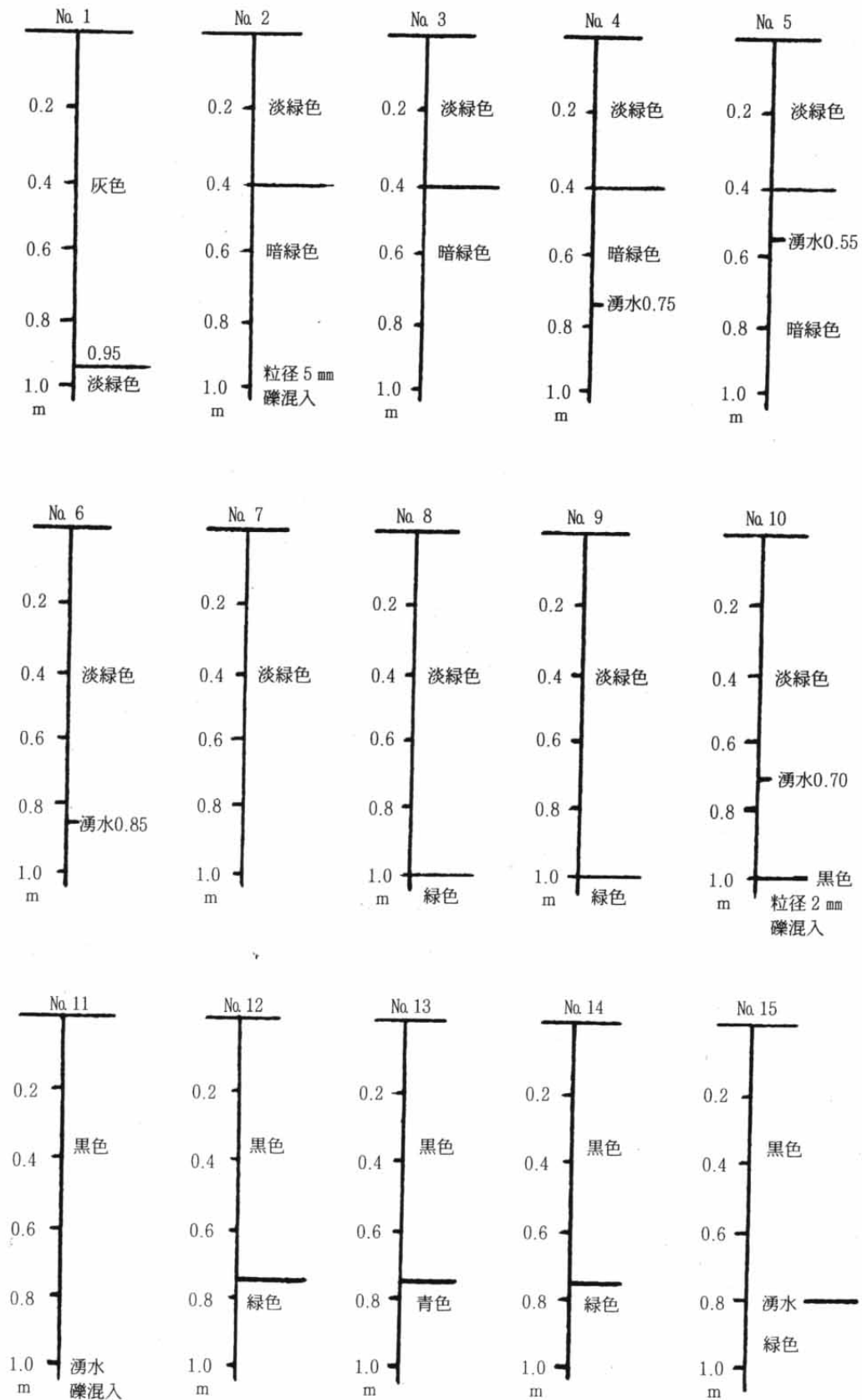
弾丸暗渠の働きは圃場に降った雨水の排水のみならず土壌構造の改善に優れた働きをする。弾丸暗渠を施工するとき、トラクターで牽引されたアタッチメント（弾丸暗渠とその付属品）が土壌を持ち上げるので、そのとき土層をはがれて、空気に触れる働きである。作物の根はこのような土層の亀裂に沿って伸びる。

結 論

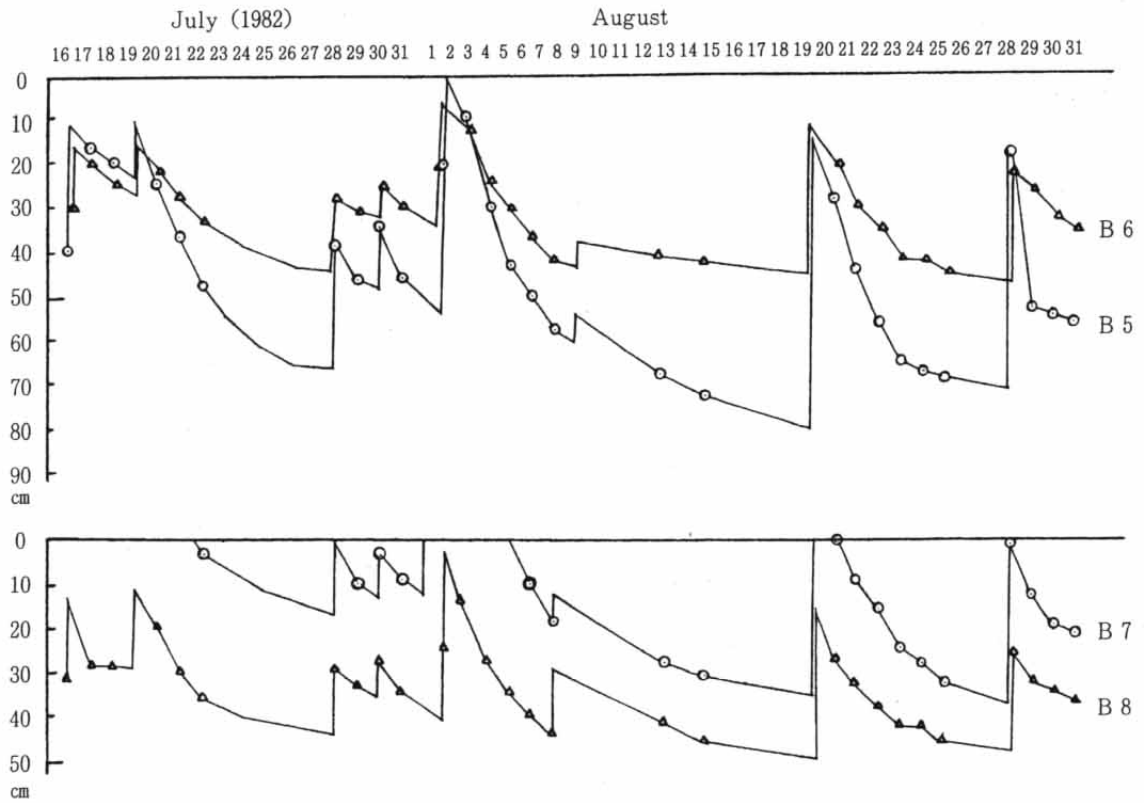
1. 作土層は雨水の溜る間隙があり、心土層は毛管間隙のみで、重力水（暗渠で排水できる水）の入る間隙は極めて乏しいことを実験で確かめた。
2. 圃場の作土層の間隙に入った雨水は、弾丸暗渠を2 m間隔に配列すれば、約1日で排水が完了する見込みである。作土層の雨水を排水すれば、過湿状態の心土層は、ほど良い湿潤状態に改良される。
3. 弾丸暗渠のもう一つの働きは、施工中に土層をはがして空気に触れさせ、作物の根の伸展を促すことである。

要 約

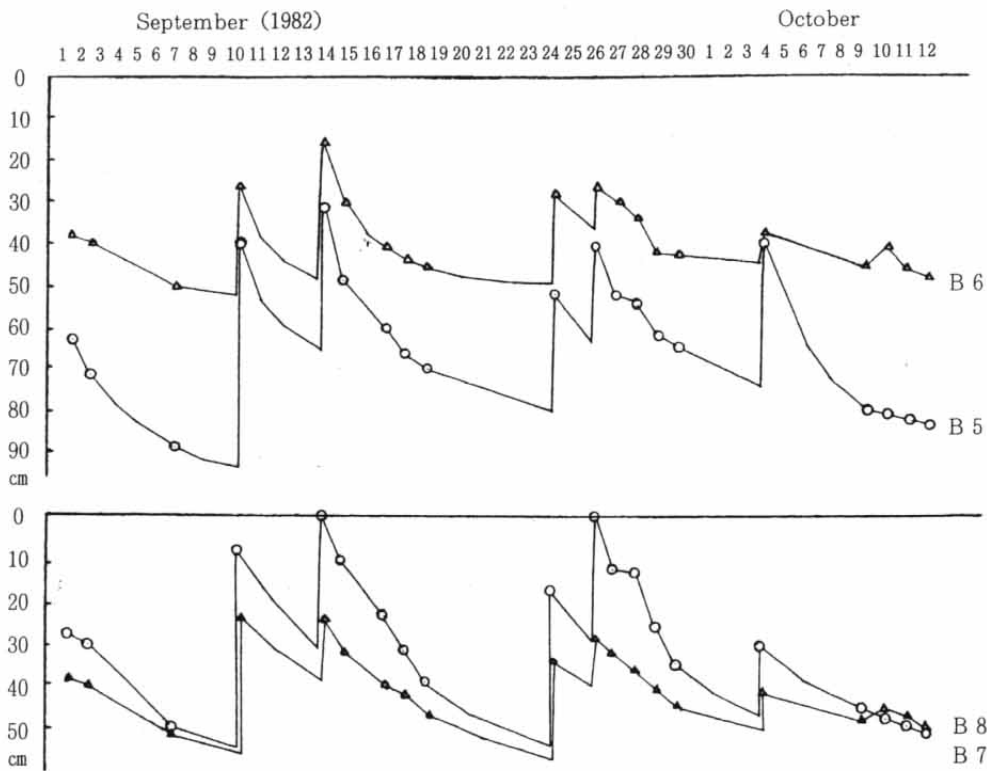
1. 作物を栽培する土壌は土粒子、水、空気から成り立っている。土粒子の間隙は水と空気とで占められる。土粒子の間隙には大小がある。



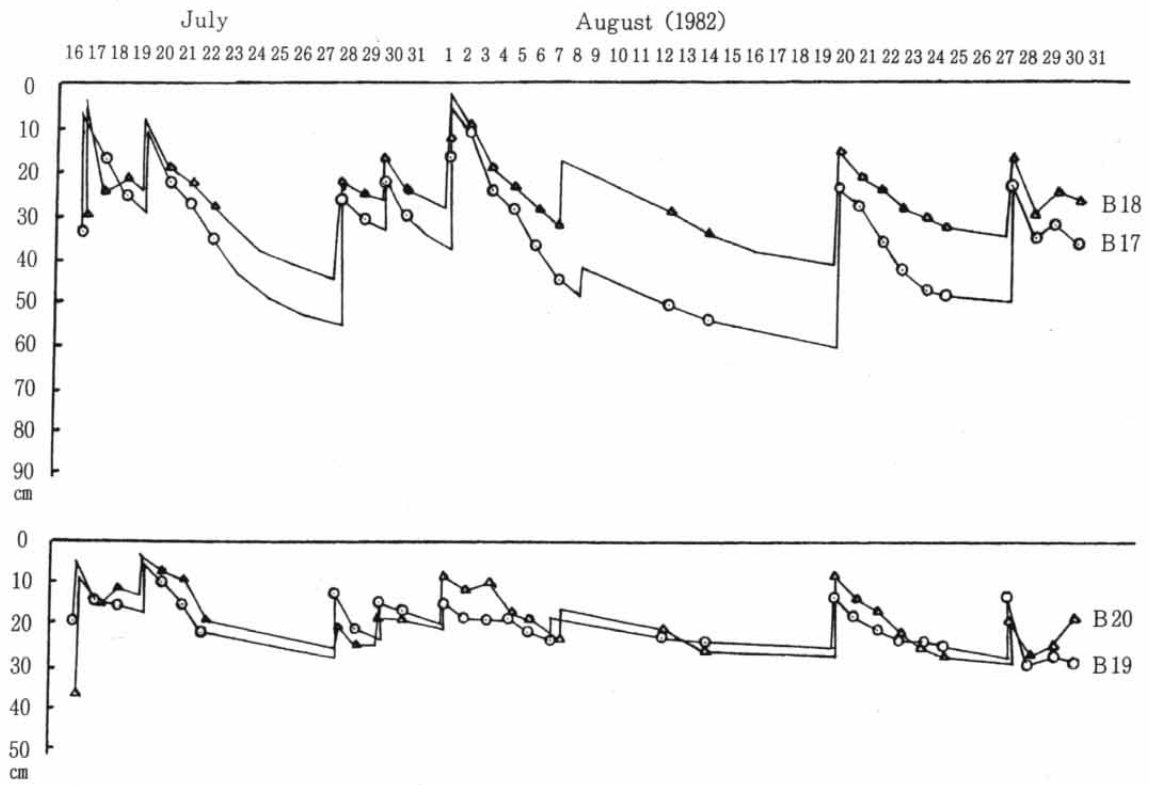
第 16 図 地層の柱状図



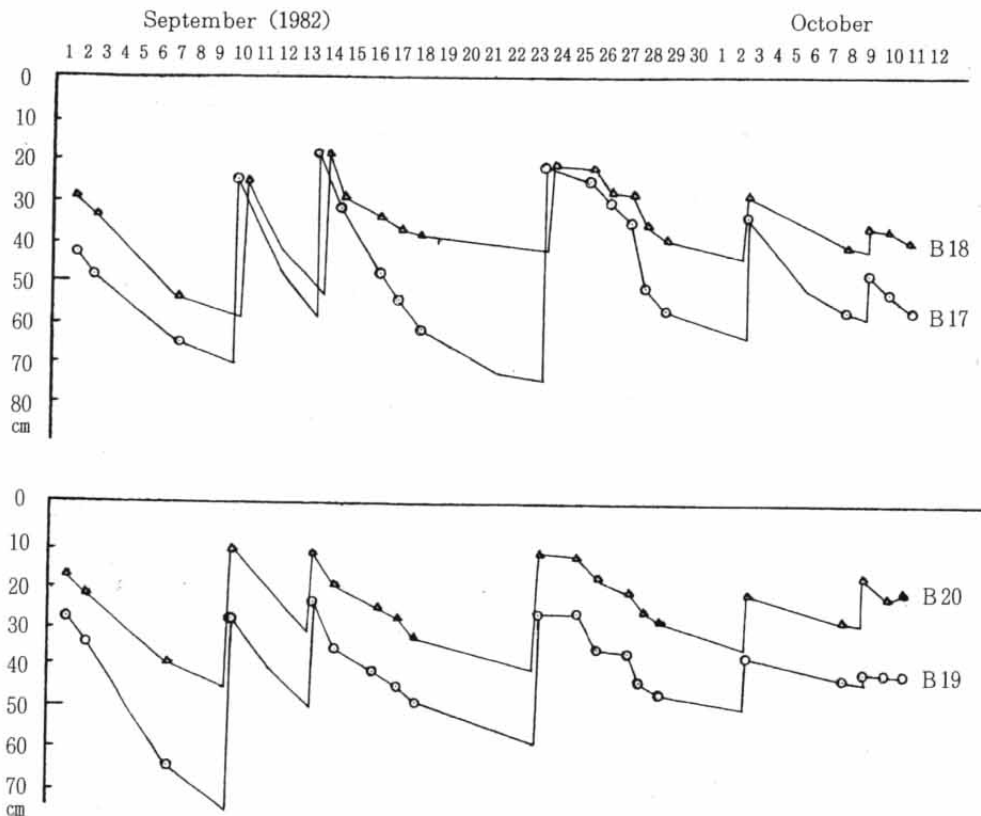
第17図 No. 81 圃場の地下水位



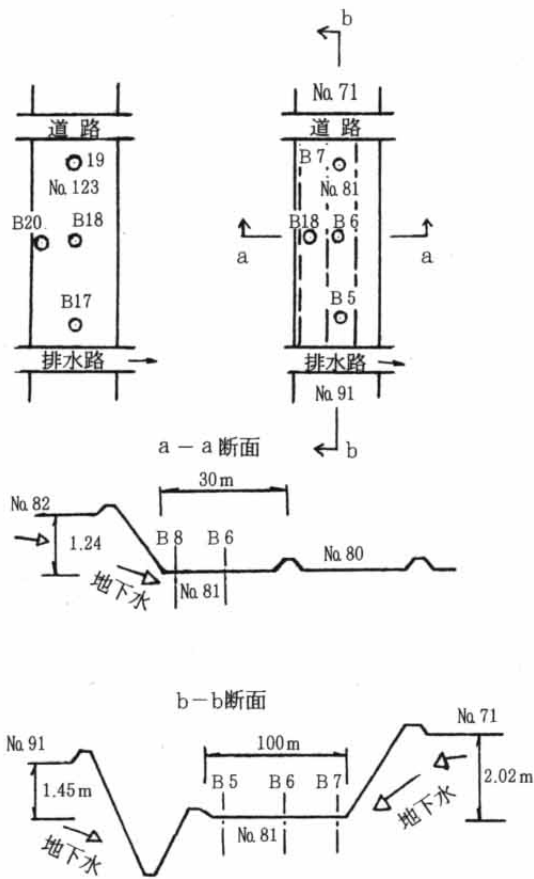
第17図 No. 81 圃場の地下水位



第18図 No. 123 圃場の地下水位



第18図 No. 123 圃場の地下水位



第19図 No. 81 圃場平面及び断面図

小さな間隙を満たしている水は毛管水と呼ばれるもので、低い所から高い所へ上昇して作物に利用される。しかしながら高い所から低い所へ移動できないので、暗渠で排水できない。

大きな間隙を満たしている水は重力水と呼ばれる。重力水は高い所から低い所へ移動して暗渠で排水できる。

2. 圃場の表面にある耕作土とその下層の心土について暗渠で排水できる有効間隙を調べた。

実験の結果、農家の圃場から採取した耕作土は、有効間隙率が5.5%あることがわかった。

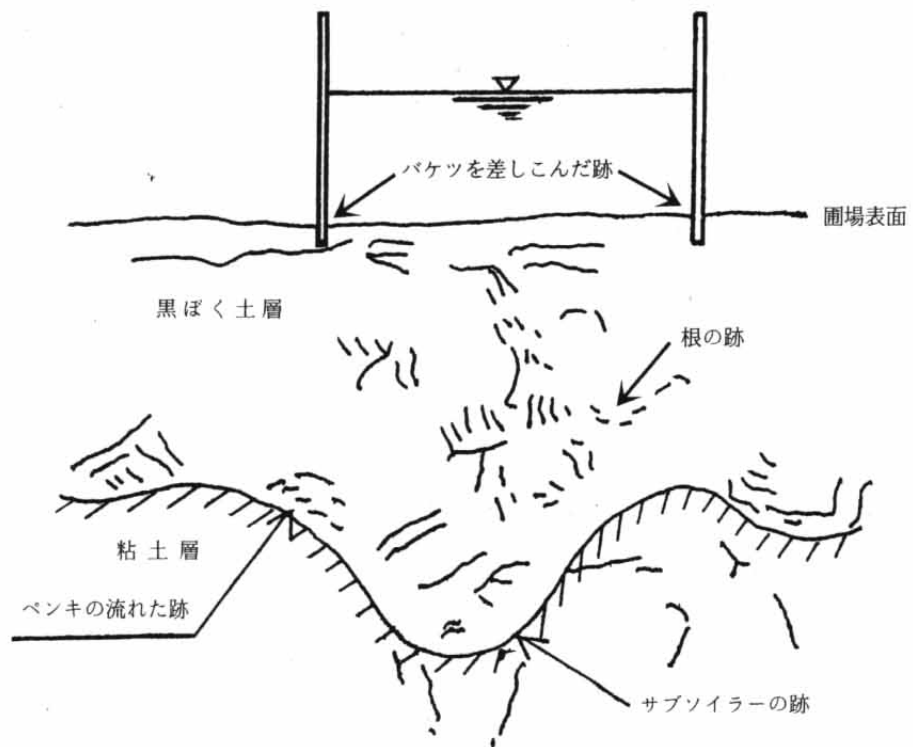
心土については次のように調べた。土粒子を篩い分けて有効間隙率の実験をした。粒径が1mmから0.5mmのものについては、有効間隙率は体積比で6.5%もあったが、粒径が小さくなるにつれて減少し、0.21mmから0.105mmになると0になった。

作土層には雨水が溜る有効間隙がある。心土層についてはほとんどないと判断できる。

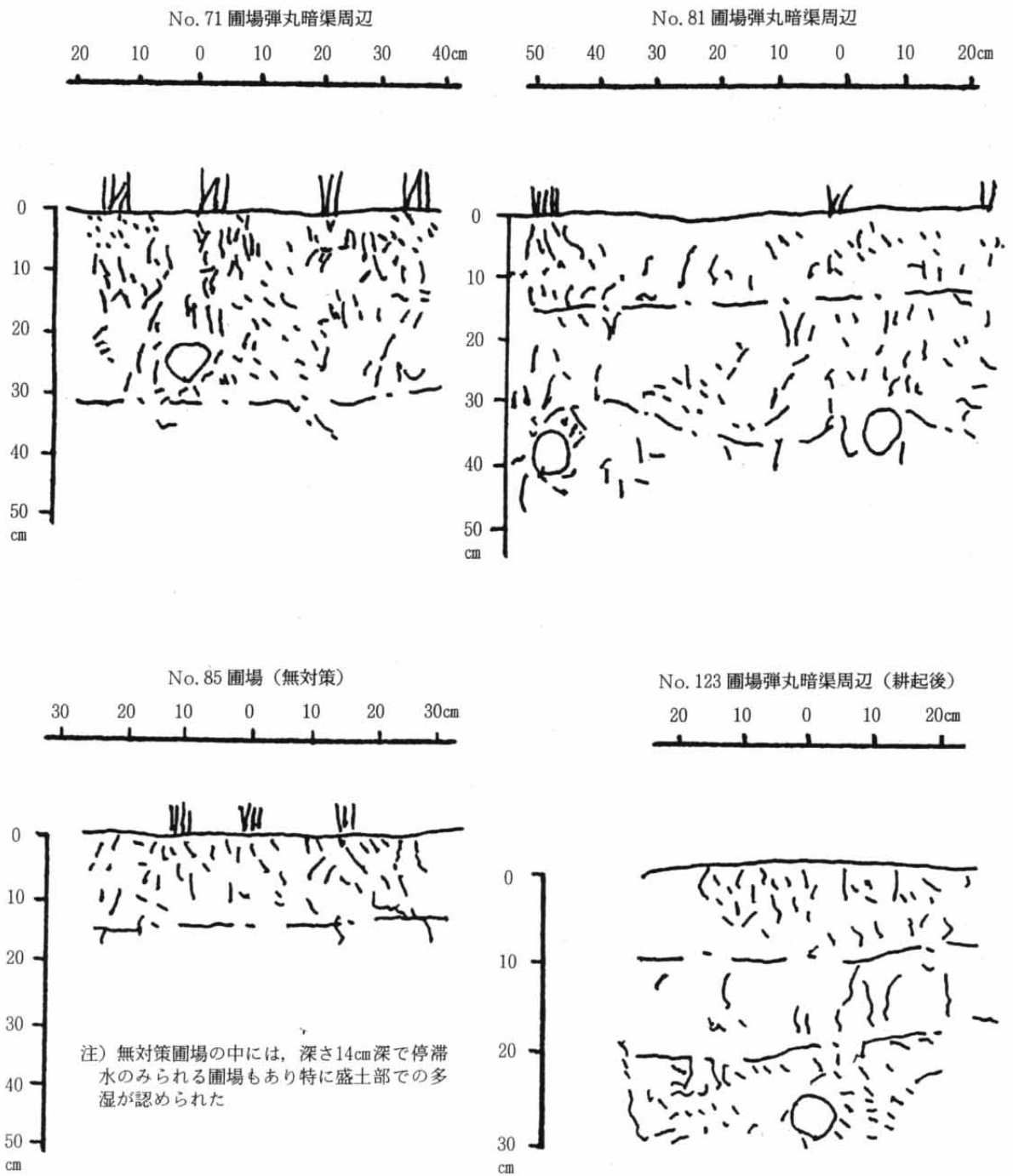
3. 耕作土中に入った雨水の排水について考察した。

透水係数 $2.9 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、有効間隙率5.5%の土壤について試算したところ、その90%は1日で排水されることがわかった。この程度ならば畑作物の生育にとって障害にならないと思われる。

4. 土壤の過湿については、雨水が耕作土中に貯留されることによるものと、地下1m内外の透水層からの地下



第20図 地下水経路の追跡図（1990 三農セ、吉川）



第21図 弾丸暗渠と小麦の根の分布 (1984三農セ, 吉川)

第7表 土壌の粘土分布

圃場名	砂	シルト	粘土	土性
No.71	59.9%	21.1%	19.0%	CL
No.81	51.1	24.0	24.9	CL
No.123	44.0	27.1	28.9	LiC

水によるものがある。

白山町地内で調査した事例によると、地下70~80cmに砂の層があり、この層を流れる地下水が、地下水位に影響を及ぼす。地下水位の上下は、地下水の水圧を表わすものである。

地下水位が高くて、地下水位の上下が小さい場合がある。この地下水位は土壌の毛管が飽和している位置を示す。

5. 白山町地内で調査した小麦の栽培と根の分布について

て考察した。弾丸暗渠を施工した圃場は、根の分布が深さ30 cmまで伸びたのに対し、無対策圃場では深さ15 cmであった。

このことから弾丸暗渠は土壌構造の改良に役立つことが認められている。弾丸暗渠は雨水の排水の他、土壌構造の改善に役立つものである。

引用文献

- 1) 本間 仁 (1955) : 水理学 丸善株式会社
- 2) 磯島義一 (1984) : 畑利用水田土壌管理対策調査報告書
- 3) 磯島義一 (1985) : 暗渠排水における地下水位低下と排水時間に関する研究 三重県農技センター研究報告第13号
- 4) 東畑四郎 (1953) : 日本農業発達史 中央公論社
- 5) 吉川重彦 (1984) : 畑利用水田土壌管理対策調査報告書
- 6) 吉川重彦 (1990) : 大区画圃場営農推進対策調査報告書

Studies on Ground Water Movement by Drainage of Sub-surface Water

(6) Design of drainage

Yoshikazu ISOJIMA

SUMMARY

Today, some of paddy fields exchange wheat fields in order to decrease production of rice. It is necessary to eliminate soil wetness, which is harmful to plants.

According to a result of experiment, there is a storage capacity of gravitational water in the top soil, but little in the sub-soil. In the top soil, which is cultivated by plow, there is gravitational water of 5.5% by volume. A storage capacity in the sub-soil, which is not cultivated, is full of capillary water, but there is no gravitational water in one. Gravitational water can drain by system of drainage, but capillary water cannot.

Rain water falls in the storage capacity of top soil, where it runs into open-ditch drainage, that is called mole drainage. If drain spacing for open-ditch drainage of silty loam is 2 meters, rainfall water will be carried out in a day from open-ditch drainage, according to a design of drainage, which is born from a differential equation such as the following:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{k}{\alpha} \left\{ y \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right\}$$

When rainfall water is carried out from the storage capacity of top soil by a system of drainage, which is combines open-ditch drainage with a pipe one, sub-soil wetness, which is harmful to plants, will improve.

Another work of open-ditch drainage is improvement of the structure of the soil. In construction of open-ditch drainage, a small shaped plow, which is one of the attachments, is pulled with a pressure head by tractor, elevating sub-soil and bringing air in the soil. In consequence of such cultivation, the plant is encouraged.