

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5報 暗渠を透水層の中間に敷設する場合の理論と実際

磯 島 義 一*

A Study on the Ground Water Movement by Drainage of Sub-surface Water

5. The comparison between theory and practice

Yoshikazu ISOJIMA

緒言

暗渠排水は明治から大正、昭和にわたって、湿田を乾田に土地改良する目的で行われてきた技術である。それは稲の収穫作業の労力が著しく節減され、収量の増加にも大きく貢献してきた。

今日求められている暗渠排水は、水田転作したほ場に畑作物を栽培するとき、十分収量が期待できるよう土地改良する技術である。

水田の土地基盤は平坦で、土壌は細粒土から構成されているので滲透水も少なく、一般に排水はよくない。このような土地に畑作物を栽培する時、土壌から畑作物の害になる湿り気、即ち過剰の水分を取り除く改良が必要である。その結果、土壌の中には以前より多くの空気を送りこむことができる。作物の根が入り易いよう土壌断面に亀裂が生じたり、土壌微生物の活動が活発になることが期待できる。土壌も起し易くなる。

著者が経験した数少ない暗渠排水の事例から二つ紹介しよう。一つは地下から湧水が田面上に吹きだして湛水状態となり、田面より20~30cmの深さまで沼のような状態になった水田を乾田化した事例がある。

深さ40cm程度の溝を人力で何本か掘削して地表水の排水を行なったところ、溝の底の数ヶ所から湧水源を発見した。この湧水を暗渠で排水路まで導水したところ、湿田は乾田に改良された。このとき湧水量が多かったので、直径10cm程度の硬質塩ビ管を使わなければならなかった。もう一つは水田転換を行うほ場に本暗渠と弾丸暗渠を組合せた暗渠を施工した。本暗渠はトレンチャーで深さ60cmに掘削して直径5cmの穴あき管を敷設した

後、作土直下までフィルターとしてもみがらを詰め、その上部に耕作土を20cm程度埋戻した。弾丸暗渠は本暗渠と直角方向に、深さ30cm、間隔2mで施工した。降雨があると暗渠から排水が始まる。これは降雨によって転作畑の作土層の空隙にたまった雨水が暗渠へ排水されるものである。転作畑における暗渠排水の主目的は、弾丸暗渠を施工して透水のよい土壌に土壌構造を改良¹⁾しようとするものである。実際、弾丸暗渠を施工する際そのアタッチメントが周りの土壌を持ちあげ、締め固まった土壌をゆるめる働きがあり、これが排水効果を高めることになる。著者は農業技術センターに勤務していたころ、暗渠排水の試験を担当した。農家のほ場で現地試験を行うかたわら室内試験で暗渠排水の本質を理解しようと努めた。前回の報告²⁾は暗渠を透水層(砂は透水層に入る。水田の土壌は難透水層に近いが、少しは透水現象があるものと思われる)の底に敷設する場合、暗渠から排水が行われて、地下水位が低下する時間的な推移を考察した。今回は水で飽和した透水層の中間に暗渠を敷設する場合、地下水位の低下と排水時間の関係を考察した。

暗渠から排水が行われるとき、水の流れは時刻と共に自由水面が低下する流れ、即ち非定常流である。時間が Δt の間に、ある断面から入ってくる流入量と、その断面より距離が Δx 隔てた次の断面から出て行く流出量との間に差異が生じて、地下水位が Δy 低下する。この現象を微分方程式で表わした。(第1図参照)

この方程式は解くにあたって次のような工夫をした。
(i) 微分方程式の解が得られるよう一つの微分方程式を、

*前作物部 現伊勢農林水産事務所

二つの微分方程式の和の形に分解した。

(ii) 暗渠の敷設位置より下の部分からも、地下水が暗渠に流入して自由水面の低下を促進させる。地下水の流れを流線で表すことができる。暗渠より上部の流線は今回求めようとしているものである。暗渠より下部の流線をCosine Curveで表わした。

その結果次のような解を得た。ある時刻、任意の位置xにおける地下水位yは、地下水位の分布に関する関数と、地下水位の低下に関する時間の関数の積の形で表わすことができた。同時に地下水位が時間と共に減衰していく実際（実験によって得られたもの）を、今回著者が作成した理論から追跡することができた。

実験材料及び研究方法

1. 実験材料

粗砂及び木曾岬干拓地から採取した土壌（細砂）を実験材料とした。

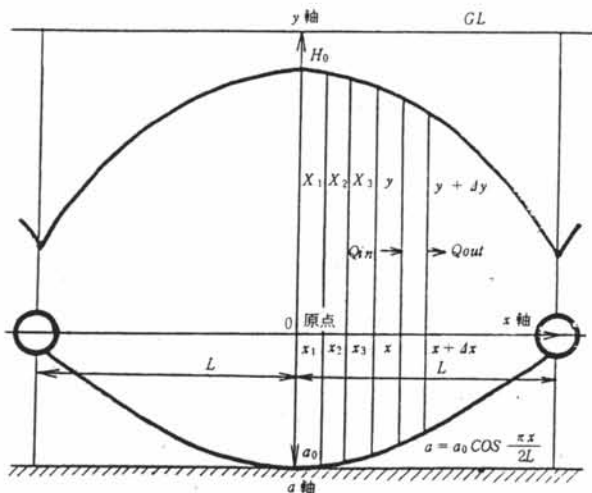
2. 実験方法

著者が作成した実験装置に粗砂及び細砂の実験材料を使用して、地下水位低下と排水時間の実測を行なった。実験方法の詳細は前回報告²⁾したので省略する。

3. 実験装置

実験装置は縦55cm、横90cm、高さ58cmの水槽を作り、実験材料を入れる部分と、水を入れる部分を設け、両者の接触面は繊維製の布で隔壁とした。水槽は任意の高さで排水できるようにした。この装置は完全な暗渠排水の装置ではないが、暗渠排水に近似の実験ができる。

4. 研究方法



第1図 暗渠排水の横断面図

暗渠排水における地下水位低下と排水時間に関する理論を作成して、室内試験から得られた実際と比較検討した。

暗渠排水に関する理論

不透水層上に厚さ $a_0 + H_0$ の透水層がある。暗渠を不透水層から a_0 だけ高い位置に、 $2L$ なる間隔で敷設する。暗渠と次の暗渠の midpoint を原点として、水平方向に x 軸を、鉛直方向に y 軸を設ける。（第1図参照）

実験材料を実験装置の中に入れ、水で空隙の中を飽和状態にしておき、暗渠から排水を開始すると、自由水面は低下を始める。時刻 t において、任意の位置 x における地下水位を y とする。時間が Δt の間に x の断面を通過して左から右に流入する水の量は

$$Q_{in} = -k \frac{\partial y}{\partial x} (y+a) dt$$

である。又同じ時間に $x + dx$ の断面を通過して左から右に流出する水の量は

$$Q_{out} = -k \frac{\partial y}{\partial x} (y+a) dt - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k \frac{\partial y}{\partial x} (y+a) dt \right\} dx$$

である。この両者の差だけ dx における水位は低下する。

$$-a dy dx = Q_{out} - Q_{in}$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{k}{a} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial y}{\partial x} (y+a) \right\}$$

$$= \frac{k}{a} \left\{ (y+a) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial y}{\partial x} \frac{\partial a}{\partial x} \right\} \quad (1)$$

なる微分方程式を得る。但し k は透水係数で、その単位は cm/s である。 α は実験材料の中に含まれる水のうち、暗渠から排水できる水に対する水を含む砂全体の割合である。この数値は体積比で表わされるものである。

(1)式は透水層の中間から排水が行われている時、地下水位の時間的な推移を表わす微分方程式である。

第1図のように暗渠から排水を行った時、透水材料即ち砂の中の自由水面（＝地下水位） y は x と t のみの関数で、一次元の浸透の問題である。(1)式を解いて自由水面の分布が得られる。(1)式の特解を

$$y = X(x) T(t) \quad a = F(x) \quad (2)$$

と仮定する。 X, T ではそれぞれ x, t のみの関数である。(2)式を(1)に代入すると

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

$$\text{ここで } \frac{dT}{dt} = A \frac{dT}{dt} + B \frac{dT}{dt} \quad A + B = 1 \quad (4)$$

とすると

$$\left[A \frac{dT}{dt} - \frac{k}{\alpha} \left\{ T^2 \frac{d^2X}{dx^2} + \frac{T^2}{X} \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 \right\} \right. \\ \left. + \left[B \frac{dT}{dt} - \frac{k}{\alpha} \left\{ \frac{FT}{X} \frac{d^2X}{dx^2} + \frac{T}{X} \frac{dX}{dx} \frac{dF}{dx} \right\} \right] \right] = 0 \quad (5)$$

(5) 式が常に成立するためには

$$A \frac{dT}{dt} - \frac{k}{\alpha} \left\{ T^2 \frac{d^2X}{dx^2} + \frac{T^2}{X} \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 \right\} = 0 \quad (6)$$

で、なお且つ

$$B \frac{dT}{dt} - \frac{k}{\alpha} \left\{ \frac{FT}{X} \frac{d^2X}{dx^2} + \frac{T}{X} \frac{dX}{dx} \frac{dF}{dx} \right\} = 0 \quad (7)$$

でなければならない。

(6) 式を変形すると

$$\frac{A}{T^2} \frac{dT}{dt} = \frac{k}{\alpha} \left\{ \frac{d^2X}{dx^2} + \frac{1}{X} \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 \right\} \quad (6')$$

となる。左辺は t のみの関数、右辺は x のみの関数であるから、(6') 式が常に成立するためには各辺が常数でなければならない。この常数を $-\beta$ とおけば

$$\frac{A}{T^2} \frac{dT}{dx} = -\beta \quad (8)$$

$$\frac{d^2X}{dx^2} + \frac{1}{X} \left(\frac{dX}{dx} \right)^2 + \frac{\alpha\beta}{k} = 0 \quad (9)$$

(8) 式は $T = \frac{1}{\frac{\beta t}{A} + \text{Const}}$ となり、 $t=0$ のとき

$T=1$ であるから $\text{Const}=1$ となるので

$$T = \frac{1}{\frac{\beta t}{A} + 1} \quad (10)$$

が得られる。(9) 式は数値計算を行なって解く。

$x=x_1, x_2, x_3$ における X の値をそれぞれ X_1, X_2, X_3 とすれば (第1図参照)

$$\frac{dX}{dx} = \frac{X_2 - X_1}{x_2 - x_1} \\ \frac{d^2X}{dx^2} = \frac{\frac{X_3 - X_2}{x_3 - x_2} - \frac{X_2 - X_1}{x_2 - x_1}}{x_2 - x_1} \quad (11)$$

$$x_3 - x_2 = x_2 - x_1 \quad \text{のように等間隔にとれば} \\ \frac{d^2X}{dx^2} = \frac{X_3 - 2X_2 + X_1}{(x_2 - x_1)^2} \quad (12)$$

(11) 式及 (12) 式を (9) 式に代入すると

$$\frac{X_3 - 2X_2 + X_1}{(x_2 - x_1)^2} + \frac{1}{X_1} \left(\frac{X_2 - X_1}{x_2 - x_1} \right)^2 + \frac{\alpha\beta}{k} = 0 \quad (9')$$

(9') 式を整理すると

$$X_3 - 4X_2 + 2X_1 + \frac{X_2^2}{X_1} + \frac{\alpha\beta}{k} (x_2 - x_1)^2 = 0$$

両辺を初期条件 $X=H_0, (x=0, t \rightarrow 0)$ で割ると

$$\frac{X_3}{H_0} - 4 \frac{X_2}{H_0} + 2 \frac{X_1}{H_0} + \frac{\left(\frac{X_2}{H_0} \right)^2}{\left(\frac{X_1}{H_0} \right)} + \frac{\alpha\beta}{k} \times \frac{L^2}{H_0} \left(\frac{x_2 - x_1}{L} \right)^2 = 0 \quad (13)$$

常数 β は次のように決定する。(13) 式のうち左から4番目までの各項は No Dimension であるから、5番目の項もそれと同じでなければならない。従って同項の係数を1とすれば

$$\beta = \frac{kH_0}{\alpha L^2} \quad (14)$$

(14) 式を (10) 式に代入すれば

$$T = \frac{1}{\frac{kH_0 t}{\alpha L^2} + 1} \quad (10')$$

$$\frac{X_i}{H_0} = Y_i$$

で表せば、($i=1, 2, 3$) (15)

(13) 式は

$$Y_3 - 4Y_2 + 2Y_1 + \frac{Y_2^2}{Y_1} + \left(\frac{x_2 - x_1}{L} \right)^2 = 0 \quad (13')$$

計算の便宜上 $x_2 - x_1 = \frac{L}{10}$ とすれば

$$Y_3 - 4Y_2 + 2Y_1 + \frac{Y_2^2}{Y_1} + 0.01 = 0$$

これを一般式で書き表わすと

$$Y_{n+2} - 4Y_{n+1} + 2Y_n + \frac{Y_{n+1}^2}{Y_n} + 0.01 = 0 \\ (n=0, 1, 2, \dots, 8) \quad (13'')$$

初期条件 $t \rightarrow 0$ で

$$x=0, y=H_0, \text{ 即ち } Y_0 = 1$$

$$x=L, y=0.3H_0, \text{ 即ち } Y_{10} = 0.3 \quad (16)$$

(16) 式の初期条件を満足するよう (13'') 式から試行錯誤の方法で求めると、自由水面 (=地下水位) の分布は第1表のとおりである。

第1表 (13')式及(16)の初期条件を満足する地下水位

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x _n	0	$\frac{1}{10}L$	$\frac{2}{10}L$	$\frac{3}{10}L$	$\frac{4}{10}L$	$\frac{5}{10}L$	$\frac{6}{10}L$	$\frac{7}{10}L$	$\frac{8}{10}L$	$\frac{9}{10}L$	L
Y _n	1.000	0.989	0.968	0.937	0.895	0.841	0.774	0.692	0.591	0.465	0.302

なお初期条件の(16)式は、これまでの実験結果より求めたものである。その詳細は考察の項で報告する。

以上の結果より(6)式を満足する微分方程式の解は

$$y = H_0 Y_n \times \frac{1}{\frac{k H_0 t}{A \alpha L^2} + 1} \quad (17)$$

ここにH₀は原点における地下水位cm, Y_nは第1表に示すような値をとり, xが0からLにおける地下水位の分布を表す関数, kは透水係数cm/s, Aは原点における, 原点より自由水面までの高さに対する不透水層から自由水面までの高さの比, 次のような関係式で示されるものである。

$$A = \frac{y_{x=0}}{y_{x=0} + a_0} \quad (18)$$

a₀は不透水層から原点までの高さcm, αは暗渠で排水できる水に対する, 水を含む土壌全体の体積比, Lは暗渠の間隔の1/2に相当する長さである。

(17)式は初期条件 t → 0, 原点においてH₀, x=Lにおいて0.3H₀の地下水位(x軸より自由水面までの高さ)が, 時刻の経過と共に排水が行われて減衰する時, 任意の位置及時刻(x, t)における地下水位yを表す関係式である。

もう一つの微分方程式(7)式を変形すると

$$\frac{B}{T} \frac{dT}{dt} = \frac{k}{\alpha} \left\{ \frac{F}{X} \frac{d^2X}{dx^2} + \frac{1}{X} \frac{dX}{dx} \frac{dF}{dx} \right\} \quad (7')$$

となる。左辺はtのみの関数, 右辺はxのみの関数であるから, この式が常に成立するためには各辺は常数でなければならぬ。この常数を-Cとおけば

$$\frac{B}{T} \frac{dT}{dt} = -C \quad (19)$$

$$\frac{F}{X} \frac{d^2X}{dx^2} + \frac{1}{X} \frac{dX}{dx} \frac{dF}{dx} + \frac{\alpha C}{k} = 0 \quad (20)$$

$$(19)式の解は T = e^{-\frac{ct}{B}} \quad (21)$$

(20)式において

$$F = a_0 \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \quad (22)$$

と仮定すると

$$\frac{dF}{dx} = -\frac{\pi a_0}{2L} \sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \quad (23)$$

(22)及(23)式を(20)式に代入すると

$$a_0 \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \frac{d^2X}{dx^2} - \frac{\pi a_0}{2L} \sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \frac{dX}{dx} + \frac{\alpha C X}{k} = 0 \quad (24)$$

(24)式は数値計算を行って解く。前回と同様に(11)式及び(12)式を(24)式に代入すれば

$$a_0 \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \frac{X_3 - 2X_2 + X_1}{(x_2 - x_1)^2} - \frac{\pi a_0}{2L} \left\{ \sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \right\} \frac{X_2 - X_1}{x_2 - x_1} + \frac{\alpha C X_1}{k} = 0$$

$$\frac{H_0 a_0 \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right)}{L^2} \times \frac{\left(\frac{X_3}{H_0} - \frac{2X_2}{H_0} + \frac{X_1}{H_0}\right)}{\left(\frac{x_2 - x_1}{L}\right)^2} - \frac{\pi a_0 H_0}{2L L} \times$$

$$\sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \left(\frac{\frac{X_2}{H_0} - \frac{X_1}{H_0}}{\frac{x_2 - x_1}{L}}\right) + \frac{\alpha H_0 C}{k} \frac{X_1}{H_0} = 0 \quad (25)$$

$$\text{ここで } \frac{X_i}{H_0} = Z_i, i=1, 2, 3 \quad (26)$$

とおくと

$$\cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right)(Z_3 - 2Z_2 + Z_1) - \frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right)(Z_2 - Z_1) \times$$

$$\left(\frac{x_2 - x_1}{L}\right) + \frac{L^2}{H_0 a_0} \frac{\alpha C}{k} H_0 Z_1 \left(\frac{x_2 - x_1}{L}\right)^2 = 0 \quad (27)$$

ここで $\frac{L^2}{H_0 a_0} \frac{\alpha C H_0}{k} = 1$ なるように定数を決定すると

第2表 (27')式及(16)の初期条件を満足する地下水位

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_n	0	$\frac{1}{10}L$	$\frac{2}{10}L$	$\frac{3}{10}L$	$\frac{4}{10}L$	$\frac{5}{10}L$	$\frac{6}{10}L$	$\frac{7}{10}L$	$\frac{8}{10}L$	$\frac{9}{10}L$	L
Z_n	1.000	0.997	0.985	0.964	0.933	0.890	0.832	0.755	0.652	0.509	0.298

$$C = \frac{a_0 k}{L^2 \alpha} \quad (28)$$

(28)式を(21)式に代入すると

$$T = e^{-\left(\frac{a_0 k t}{B L^2 \alpha}\right)} \quad (21')$$

ここでLを10等分する. $x_2 - x_1 = \frac{L}{10}$ であるから

(27)式は

$$\cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right)(Z_3 - 2Z_2 + Z_1) - \frac{\pi}{20} \sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right)(Z_2 - Z_1) + \frac{Z_1}{100} = 0 \quad (27')$$

初期条件(16)式を満足するよう(27')式から試行錯誤の方法で地下水位の分布を求めると、第2表のとおりである。こゝでもZの右下に小さく書かれている数値1, 2, 3はそれぞれn, n+1, n+2に読みかえる。但しn=0, 1, 2, ..., 8の値をとる。

以上の結果より(7)式を満足する微分方程式の解は

$$y = H_0 Z_n \times \frac{1}{e^{\left(\frac{a_0 k t}{B \alpha L^2}\right)}} \quad (29)$$

Z_n は第2表に示すように、xが0からLにおける自由水面の分布を表わす関数である。Bは不透水層から原点までの高さに対する不透水層から自由水面までの高さの比で、次の関係式で表す。

$$B = \frac{a_0}{y_{x=0} + a_0} \quad (30)$$

実験結果

手作りの実験装置である水槽は、砂を入れる部分と水を入れる部分にわけ、その隔壁は太い繊維の布で仕切りを行なっており、その隔壁から水が自由に行き来できるようになっている。排水の位置は水槽の底から10.5cm上部に設けてある。

砂は粗砂と細砂の2種類について実験を行った。まず砂の中の空隙を水で飽和させてその後、排水を行って排

第3表 暗渠排水における地下水位の推移(粗砂)

時刻	流量	暗渠からの距離					
		5 cm	10	15	30	45	67.5
0	0	32cm	32	32	32	32	32
15秒		11.6	12.8	16.3	22.0	24.0	26.5
30		10.0	11.2	14.0	19.5	20.6	22.5
45		9.8	10.8	13.3	18.5	19.6	21.5
1分00秒		9.4	10.5	12.9	17.5	18.8	20.5
1:30	54.5	8.6	9.5	11.7	16.1	17.0	18.6
2:00	45.0	7.3	8.6	10.3	14.3	15.6	16.9
2:30	43.0	6.4	7.4	9.5	13.2	14.2	15.5
3:00	31.0	5.8	6.7	8.6	11.9	13.2	14.2
4:00	28.5	5.1	5.7	7.3	10.2	11.1	12.1
5:00	24.5	4.4	4.8	6.1	8.6	9.5	10.3
6:00	20.5	3.8	4.2	5.1	7.1	8.1	8.7
7:00	17.5	3.3	3.5	4.4	6.2	7.0	7.5
8:00	15.0	2.9	2.9	3.8	5.4	6.1	6.5
9:00	13.0	2.6	2.6	3.3	4.7	5.2	5.5
10:00	12.0	2.2	2.3	3.0	4.1	4.5	4.8
12:00	8.5	1.8	2.1	2.4	3.3	3.6	3.6
14:00	6.5	1.4	1.7	1.9	2.6	2.8	2.8
16:00	5.0	1.1	1.4	1.5	2.2	2.2	2.2

(注) 透水層の厚さは42.5cm, 暗渠は透水層の底より10.5cm上部に設けた。地下水位は暗渠より自由水面までの高さを示す。

水量及び自由水面の分布の観測を行った。その結果は第3表及び第4表の通りである。

考察

1 排水の境界条件

原点における地下水位Hが、暗渠で排水が行われて動水勾配を生じ、距離Lだけ離れた暗渠の出口でどれだけ低下するか考察する。

第4表 暗渠排水における地下水位の推移（細砂）

時刻	流量	暗渠からの距離					
		5 cm	10	15	30	45	67.5
0	0	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5
15秒	224.5 $\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$	15.0	19.0	24.6	30.5	30.5	30.5
30	31.5	10.7	15.5	21.1	29.0	29.0	29.0
45	20.0	8.8	13.5	18.2	25.0	25.4	27.0
1分00秒	13.5	8.0	12.3	16.8	23.4	23.8	25.7
1:30	11.5	6.6	10.6	14.5	20.9	21.0	22.8
2:00	8.5	5.3	8.8	12.2	17.7	19.0	19.0
2:30	7.0	4.2	6.9	9.4	13.3	14.6	14.6
3:00	5.0	3.3	5.5	7.4	10.2	11.3	11.3
3:30	4.0	2.7	4.5	6.0	8.0	8.8	8.8
4:00	3.5	2.3	3.9	4.8	6.4	6.6	7.5
4:30	3.0	2.0	3.3	4.3	5.4	5.5	6.1
5:00	2.5	1.7	3.1	3.6	4.5	4.6	5.1
6:00	2.0	1.3	2.5	3.0	3.2	3.3	3.7
7:00	2.0	1.0	2.0	2.4	2.5	2.5	2.7
8:00	1.5	0.8	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0
9:00	1.0	0.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7
10:00	1.0	0.5	1.3	1.5	1.5	1.5	1.5

(注) 透水層の厚さは41.0cm。暗渠は透水層の底より10.5cm上部に設けた。地下水位は暗渠より自由水面までの高さを示す。

その手法は実験によって得られた各観測位置における地下水位を、原点における地下水位で割り無次元化した。試験は前回2実験、今回2実験あわせて4実験の平均値を求めたところ、第5表の結果を得た。

これは原点で高さ1、暗渠の位置で高さ0.3の地下水位の形状で、地下水が移動することを示すものである。但し、暗渠の位置では観測していないので、その近傍(5cm, 10cm)の観測値から暗渠の位置の地下水位を、著者の作成した理論式から推定したものである。

第5表 実験値を無次元化した暗渠排水における自由水面

暗渠からの距離	0 $\frac{\text{cm}}{\text{cm}}$	5	10	15	30	45	67.5
自由水面	0.311	0.450	0.561	0.660	0.860	0.932	1.000

(注) 但し自由水面は暗渠を基準とした高さを示す。第5-1, 5-2, 5-3, 5-4各表の平均値を平均した。

第5-1表 前回報告²⁾の実験値(粗砂, 透水層の底に暗渠を敷設した場合)を無次元化した暗渠排水における自由水面

時刻	流量		暗渠からの距離					
			5cm	10	15	30	45	67.5
分秒	$\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$							
1:40	55.5	自由水面	0.408	0.524	0.620	0.860	0.940	1.000
2:40	45.1		0.414	0.529	0.622	0.870	0.953	1.000
4:10	35.0		0.440	0.542	0.634	0.828	0.954	1.000
6:40	23.8		0.444	0.540	0.629	0.814	0.925	1.000
10:30	14.6		0.482	0.586	0.678	0.862	0.977	1.000
16:40	8.0		0.529	0.686	0.725	0.880	0.980	1.000
平均値			0.452	0.567	0.651	0.852	0.954	1.000

第5-2表 前回報告²⁾の実験値(細砂, 透水層の底に暗渠を敷設した場合)を無次元化した暗渠排水における自由水面

時刻	流量		暗渠からの距離					
			5 cm	10	15	30	45	67.5
0	0	自由水面	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
15秒	46.7 $\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$		0.617	0.658	0.706	0.839	0.938	1.000
30	19.6		0.515	0.582	0.662	0.796	0.924	1.000
45	15.0		0.515	0.551	0.636	0.763	0.893	1.000
分秒								
1:00	12.0		0.521	0.541	0.634	0.740	0.867	1.000
1:30	8.0		0.514	0.542	0.595	0.716	0.834	1.000
2:00	6.2	自由水面	0.555	0.575	0.626	0.752	0.868	1.000
2:30			0.568	0.622	0.646	0.778	0.847	1.000
3:00	4.5		0.570	0.633	0.676	0.802	0.887	1.000
3:30			0.593	0.674	0.699	0.837	0.902	1.000
4:00	2.7		0.600	0.690	0.700	0.863	0.909	1.000
4:30			0.610	0.700	0.711	0.830	0.900	1.000
5:00	2.5		0.655	0.744	0.755	0.877	0.920	1.000
10:00		0.711	0.730	0.750	0.961	0.980	1.000	
20:00		0.785	0.821	0.857	0.928	0.964	1.000	
平均値		0.594	0.647	0.689	0.820	0.895	1.000	

2 2通り生まれた理論式の吟味

一つの理論式(17式)は前回報告²⁾した、暗渠を透水層の底に設けた場合の関係を少し修飾して、暗渠を透水層の中間に敷設した場合の水理を説明するものである。それはA(18式)という無次元の変化する数値で、時間の関数を修飾したのが特長である。

もう一つの理論式(29式)は、暗渠の下部の流線(Cosine Curve)と時間の関数にB(30式)という無次元の変化する数値を使って、暗渠を透水層の中間に敷設した場合の水理を説明するものである。

ある時刻に、ある場所における地下水位は一つであるから、2通りの理論式から計算できる、ある時刻ある場所における地下水位は同一のものでなければならない。

数値計算を行なって比較した結果、各時刻における地

第5-3表 第3表を無次元化した暗渠排水における自由水面（暗渠を透水層の中間に敷設した場合，粗砂）

時刻	流量		暗渠からの距離					
			5 cm	10	15	30	45	67.5
0	0	自由水面	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
15秒			0.437	0.483	0.615	0.830	0.905	1.000
30			0.444	0.497	0.622	0.866	0.915	1.000
45			0.455	0.502	0.618	0.860	0.911	1.000
1分：00秒			0.458	0.512	0.629	0.868	0.917	1.000
1：30	54.5		0.462	0.510	0.629	0.865	0.913	1.000
2：00	45.0		0.431	0.508	0.609	0.846	0.923	1.000
2：30	43.0		0.412	0.477	0.612	0.851	0.916	1.000
3：00	31.0		0.408	0.471	0.605	0.838	0.929	1.000
4：00	28.5		0.421	0.471	0.603	0.842	0.917	1.000
5：00	24.5		0.427	0.466	0.592	0.834	0.922	1.000
6：00	20.5		0.436	0.482	0.586	0.816	0.931	1.000
7：00	17.5		0.440	0.466	0.586	0.826	0.933	1.000
8：00	15.0		0.446	0.446	0.584	0.830	0.938	1.000
9：00	13.0		0.472	0.454	0.600	0.845	0.945	1.000
10：00	12.0		0.479	0.458	0.625	0.845	0.937	1.000
12：00	8.5	0.500	0.583	0.666	0.916	1.000	1.000	
14：00	6.5	0.500	0.607	0.678	0.928	1.000	1.000	
16：00	5.0	0.500	0.636	0.681	1.000	1.000	1.000	
平均値			0.451	0.501	0.618	0.861	0.936	1.000

第5-4表 第4表を無次元化した暗渠排水における自由水面（暗渠を透水層の中間に敷設した場合，細砂）

時刻	流量		暗渠からの距離					
			5cm	10	15	30	45	67.5
0	0	自由水面	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
15秒	224.5		0.516	0.616	0.803	1.000	1.000	1.000
30	31.5		0.357	0.526	0.722	1.000	1.000	1.000
45	20.0		0.313	0.490	0.667	0.924	0.939	1.000
1分：00	13.5		0.297	0.468	0.646	0.908	0.924	1.000
1：30	11.5		0.273	0.452	0.627	0.914	0.919	1.000
2：00	8.5		0.448	0.632	0.632	0.929	1.000	1.000
2：30	7.0		0.262	0.453	0.631	0.907	1.000	1.000
3：00	5.0		0.259	0.462	0.638	0.898	1.000	1.000
3：30	4.0		0.265	0.481	0.662	0.903	1.000	1.000
4：00	3.5		0.257	0.485	0.614	0.842	0.871	1.000
4：30	3.0		0.267	0.500	0.678	0.875	0.892	1.000
5：00	2.5		0.260	0.565	0.673	0.869	0.891	1.000
6：00	2.0		0.250	0.625	0.781	0.843	0.875	1.000
7：00	2.0		0.227	0.681	0.818	0.909	0.909	1.000
平均値				0.303	0.531	0.685	0.908	0.944

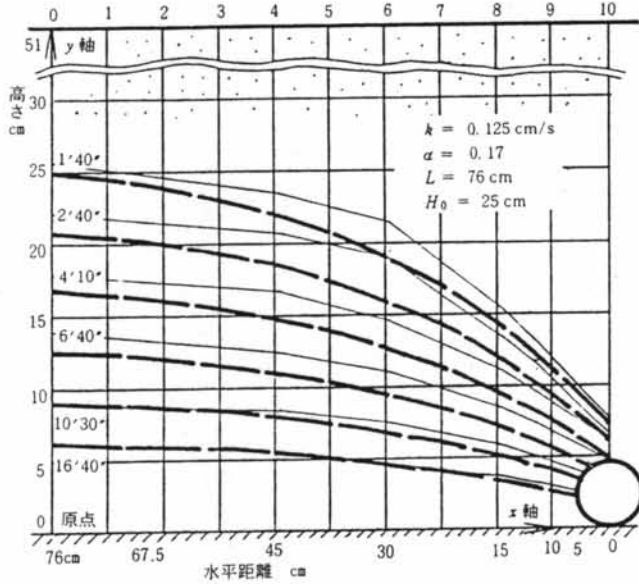
第6表 暗渠排水における地下水位低下と排水時間

暗渠を透水層の中間に敷設した場合（粗砂）
 水位の上段は（17）式が双曲線に沿って減衰する場合。
 下段は（29）式が指数曲線に沿って減衰する場合。

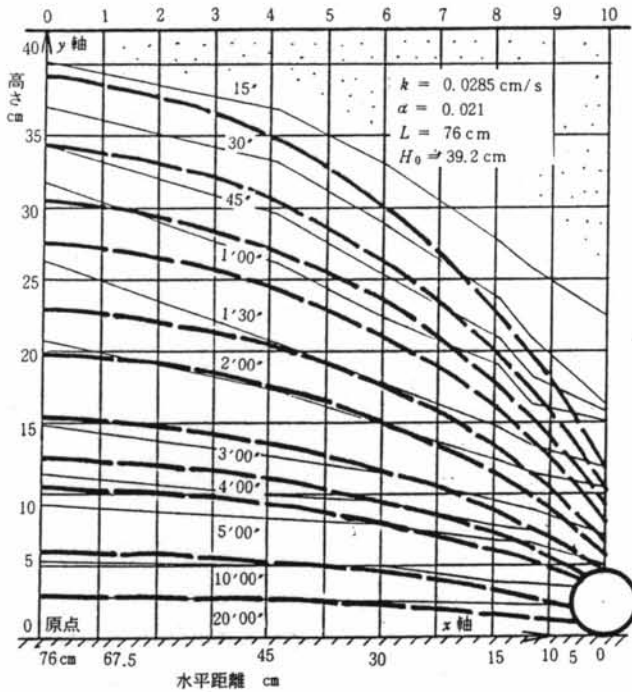
時刻		30'	1'	2'	3'	4'	5'	7'	10'	
位置	0	地	24.7	21.4	17.4	14.3	12.0	10.2	7.7	5.3
			24.7	21.6	16.9	13.7	11.4	9.7	7.0	4.8
	1	下	24.4	21.4	17.2	14.1	11.8	10.0	7.6	5.2
			24.6	21.5	16.8	13.7	11.4	9.7	7.0	4.8
	2	水	23.9	21.0	16.8	13.8	11.6	9.8	7.4	5.1
			24.3	21.3	16.6	13.5	11.2	9.6	6.9	4.7
	3	位	23.1	20.3	16.3	13.3	11.2	9.5	7.2	4.9
			23.8	20.8	16.3	13.2	11.0	9.4	6.7	4.6
	4	y	22.1	19.4	15.5	12.7	10.7	9.1	6.8	4.7
			23.0	20.2	15.8	12.8	10.6	9.1	6.5	4.5
	5		20.1	18.2	14.6	12.0	10.0	8.5	6.4	4.4
			22.0	19.2	15.0	12.2	10.1	8.6	6.2	4.3
	6		19.1	16.7	13.4	11.0	9.2	7.8	5.9	4.1
			20.5	18.0	14.1	11.4	9.5	8.1	5.8	4.0
	7		17.0	15.0	12.0	9.8	8.3	7.0	5.3	3.6
			18.6	16.3	12.8	10.3	8.6	7.3	5.3	3.6
	8		14.5	12.8	10.2	8.4	7.0	6.0	4.5	3.1
			16.1	14.1	11.0	8.9	7.4	6.3	4.6	3.1
	9		11.4	10.0	8.6	6.6	5.5	4.7	3.5	2.4
			12.6	11.0	8.6	7.0	5.8	4.9	3.6	2.4
10		7.4	6.5	5.2	4.3	3.6	3.0	2.3	1.6	
		7.3	6.4	5.0	4.1	3.4	2.9	2.1	1.4	

下水位の分布は、10%程度の誤差の範囲に入るので、2つの理論式はほぼ同一のものであると見なせる。その計算例は第6表を参照。

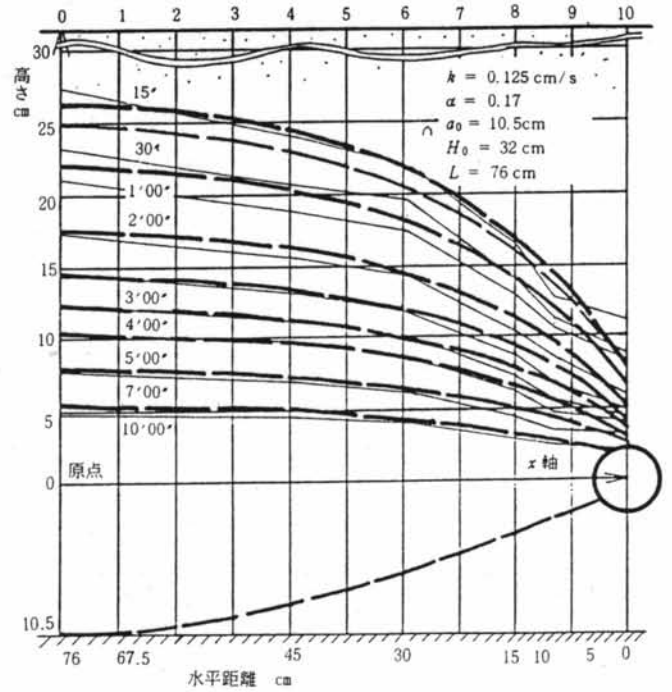
この理論値は実験値をよく追跡している。第2図から第5図を参照。



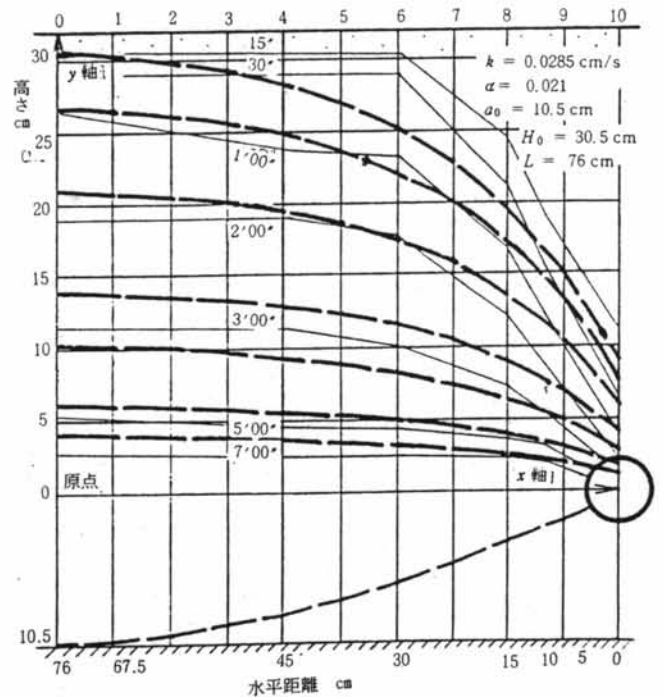
第2図 暗渠排水における地下水位低下と排水時間
暗渠を透水層（粗砂）の底に敷設した場合
細線は実測値，太線は理論値



第3図 暗渠排水における地下水位低下と排水時間
暗渠を透水層（細砂）の底に敷設した場合
細線は実測値，太線は理論値



第4図 暗渠排水における地下水位低下と排水時間
暗渠を透水層（粗砂）の中間に敷設した場合
細線は実測値，太線は理論値



第5図 暗渠排水における地下水位低下と排水時間
暗渠を透水層（細砂）の中間に敷設した場合
細線は実測値，太線は理論値

3 水田転作における暗渠排水について

前回²⁾粗砂及細砂について透水試験を行った結果は第7表のとおりである。

土壌の中には高い所から低い所へ自由に移動できる水

第7表 粗砂及細砂の透水係数及重力水の空隙率

名称	透水係数	重力水の空隙率	備 考
粗砂	0.125cm/s	0.17	重力水の空隙率とは、暗渠で排水できる水にする水を含む土壌全体の体積比
細砂	0.0285	0.021	

(重力水)と、毛管作用によって低い所から高い所へ移動できる水(毛管水)がある。毛管水は植物が利用できる水であるが、重力水と違って高い所から低い所へ移動できない。

暗渠で排水できる水は重力水に限られる。第7表を見ると、透水係数が約1/4に減少すると重力水が入ることのできる空隙は1/8に減少している。

水田を構成している土壌は大部分シルト質土壌で、透水係数は小さい。従って暗渠で排水できる水が入る空隙は極めて小さいであろう。

透水係数の小さい土壌は大きい土壌と比べて滲透水量が少ない。従って降雨などによりたまった多量の水は一時に土壌の中を滲透できない。土壌の中の通路がせまくて、しかも通路の数が少ないからである。

水田転作のため、耕起されたほ場は土塊と土塊の間にたくさんの雨水が入る空隙がある。人工的に弾丸暗渠を施工して排水の水みちを作り、それを本暗渠に集めて排水路へ導くことが大切である。

結論及び要約

耕地における暗渠排水を行って、地下水が時刻の経過と共に低下していく実際の現象を追跡する著者の理論が完成した。

暗渠排水の現地試験については、農業技術センターをはじめ、当時の農業改良普及所、耕地事務所の皆さんに大変お世話になった。論文作成に関しては、片岡一男農業技術センター所長に御指導を賜わった。心から感謝いたしたい。

引用文献

- 1) DIN 1185 (December 1973) :
Control of Sub-surface Water Management by Draining with Pipes, Open-ditch Drainage and Amelioration of the Sub-soil
- 2) 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, 第4報 室内試験における理論と実際, 三重県農業技術センター研究報告第13号