九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

地下水位測定用パイプ内の流れによる地下水流の乱れ

田中, 明
九州大学農学部灌漑利水工学教室

https://doi.org/10.15017/23221

出版情報：九州大學農學部學藝雜誌. 31 (1), pp.33-40, 1976-09. 九州大學農學部
バージョン：
権利関係：

九大農学芸誌 (Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.)
第31巻 第1号 33-40 (1976)

地下水位測定用パイプ内の流れによる地下水流の乱れ

田 中 明
九州大学農学部灌漑利水工学教室
(1976年6月2日受理)

Variation of the Groundwater Flow Due to the Flow in an Observation Perforated Pipe

AKIRA TANAKA
Laboratory of Irrigation Engineering, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812

I. 緒 言

地下水位を測定する目的で，自由面地下水流の中に多孔性パイプ（以下パイプと称する）を設置したとき，地下水流はパイプ内における水の流れの影響をうけて乱される．パイプ内の水位はこの乱された地下水位に対応するので，パイプ内水位をそのまま自然の地下水位とすることはできない．精度の高い測定および測定データの正しい評価を行なうためには，この乱れの大きさの程度を知る必要がある．

本研究では，まずパイプ内の水面がもつ物理的意味について検討し，つぎにパイプによる地下水流の乱れの大きさとパイプの径，設置深さ，地下水面勾配との関係を調べた．

II. 地下水位測定用パイプ内の水位について

地下水面とは，地下水の圧力が大気圧に等しく，その上方は不飽和帯を通して大気に接し，下方は飽和状態であるような面である．

地下水位は地下水面の位置である．この定義は厳密にいえばいくつかの問題を含んでいる．例えば圧力が大気圧に等しい面の上方にも飽和帯は存在し，とくに地下水面が低下しているような非定常状態ではこの面の上方にかなりの飽和帯が残る．また一般にこの面の下方では空気が封入されていて完全飽和状態になりにくい．このように地下水面のもつ意味についてはいくつかの問題があるが，測定の容易さから地下水位測定が広範に行なわれ，水田浸透量や作物生育との関連について研究されている（三好，1973；杉山ら，1969）．

地下水位測定にはパイプを利用した観測井がよく使用されるが，このとき地下水面が地下に存在しない場合にもパイプ内に水面が形成されることがあるほか，パイプによる地下水位の乱れにもとづく測定誤差，time lag などにより，パイプ内の水位をそのまま地下水位とみなすことができない場合がある．

パイプ内水面のもつ意味およびパイプの役割については従来から多くの研究者によつて研究されてきた．例えば Kirkham (1947) は，パイプは透水係数の大きな透水層として作用すると説明し，降下浸透流があるときのパイプは吸込み (sink) として作用し，この付近の地下水面を低下させ，また上昇浸透流があるときは吹出し (source) として作用し地下水面を上昇させると述べている．また Myers and van Bavel (1963) は水理条件が変化するときは井戸（パイプに相当する）内の水面が安定するまでに時間を要し，井戸の浸出面と水でみたされた部分は短絡路 (short) として作用すると述べている．このほかに中川 (1964)，長堀・三野 (1966) らはパイプ内水位とパイプ付近の浸透水の圧力との関連を実験的に求めている．これらの定性的な研究に対して，地下水位測定のときの time lag および透水係数の測定に関連して静止した地下水中に設置されたパイプ，オーガーホールなどの場合については理論的に取り扱われている (Talsma, 1963)．しかしたん水した水田に設置されたパイプのように，流動している地下水中に多孔性ストレーナ部分があるような場合についての理論的な研究はなく，パイプ内水面のもつ物理的意味についても

従来から不明確であつた．そこで筆者は前報（田中・田辺，1972）において，定量的な考察のためにはパイプ内に水面が生じる機構をつぎのように表現するのが適当であると述べた．すなわち定常状態においては「パイプ内の水面は透水層からパイプ内への流入量とパイプ内から透水層への流出量が平衡する位置に生じる」．

したがつて地下に地下水面が存在しなくとも，この機構にしたがつてパイプ内に水面が形成される場合も生じる．

この物理的意味にもとづいて水田に設置されたパイプに関する浸透流の2次元モデルを Fig. 1 のように作成し，パイプ内水位について解析を行なつた．このとき，パイプ内水位がストレーナ部分にある場合については近似的な取り扱いをした．この近似法では大気に接した透水性境界での水頭分布を高さの1次式で表わしたが，このような取り扱い方は多孔性ストレーナの開口面積が小さく，ストレーナによる損失水頭が無視されないときはとくに適用可能であろうと考えられる．しかし開口面積が大きくストレーナ部分を透水性境界とみなせる場合は厳密に解析することができる．解析解は自由水面をもたない浸出面の特性を考慮して求めなければならないが，すでにその解は降下浸透領域における排水溝に関連して得られているので（田中，1974），ここでは結果だけを示す．ただしパイプ内水位は一定とする．

$$
\left.
\begin{aligned}
&H_1 > F_1\ (H_2)\ \text{のとき}\\
&\frac{Q}{Lk} = a\frac{H_1}{L} + b\frac{H_2}{L} + c\\
&H_1 < F_1\ (H_2)\ \text{のとき}\\
&\frac{Q}{Lk} = c_f\frac{H_1}{L} + c_g\\
&\text{または}\\
&\frac{Q}{Lk} = c_h\frac{H_2}{L} + c_i
\end{aligned}
\right\}\quad (1)
$$

ここで $H_1 = F_1(H_2)$ は浸出開始点（C′）が C 点に一致したときの H_1 と H_2 の関係で，Q は CE を負の方向に横切つて流れる単位幅あたりの流量である．また a, b は L, l_1, l_2 の，c は L, l_1, l_2, l_p の，そして $c_f \sim c_i$ は $L, l_1, l_2, l_p, H_1, H_2$ の函数である．パイプ内水位が定常状態である場合は $Q=0$ となり，パイプ内水位は（1）式を利用して境界条件から決定される．

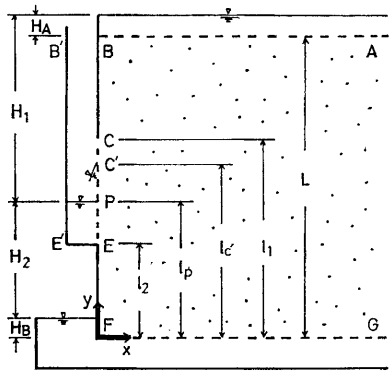

Fig. 1. Two-dimensional model of flow into the perforated pipe installed in a paddy field.

また，パイプ内水位の time lag の評価のような非定常状態も（1）式によつて解析することができるが，$c_f \sim c_i$ が H_1, H_2 の函数であるので計算は複雑である．

前述のパイプ内に水面が形成される機構の妥当性を，飽和鉛直降下浸透流の中に設置されたパイプの2次元モデル（長方形パイプ）について理論的に確かめたが，この機構は，他のいかなる浸透流の中に設置された実際の円形パイプの場合に対しても適用される．

例えばパイプ近傍の浸透水の圧力が負圧であるような成層浸透流，地下水面上の不飽和帯などにパイプのストレーナ部分がある場合，この負圧部分では浸透水はパイプ内に流入しない．浸透水は圧力が大気圧より大きな部分で流入する．したがつて簡単な考察によつてパイプ内水位は地下水位と一致することが容易にわかる．また浸透水の圧力が負圧の領域のみにパイプのストレーナ部分があるときはパイプ内に水面は生じない．

このように，条件によつてはパイプ内水位がパイプ近くの地下水位と一致することもあるが，鉛直方向の浸透流がある場合にはパイプ付近の地下水位はすでにパイプ内の流れによつて乱されているので，パイプ内水位を自然の地下水位とすることはできない．

Ⅲ．パイプによる自由面地下水流の乱れの解析

対象とする地下水流を Fig. 2 に示す．上流側に水位 135 cm の水源があり，ここから水位 25 cm の下流排水溝に向かう自由面地下水流が形成されている．ここではこの地下水流の中にパイプが設置されていないときと，設置されているときの地下水位分布を比較

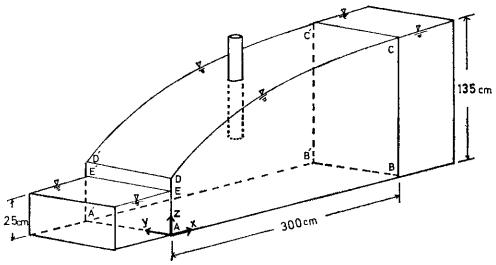

Fig. 2. Pipe for measuring the groundwater level in the flow of free-surface groundwater.

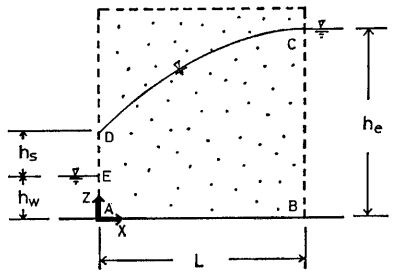

Fig. 3. Two-dimensional flow system without pipe.

し，両者の差とパイプの径，設置深さとの関係について考察する．問題の性格上，3次元的に取り扱う必要があるが，一般に3次元自由面地下水流問題の解析解を得るのは非常に困難であるので，ここでは差分法による数値計算を行なう．また地下水面上の不飽和帯は考慮しない．

パイプがない場合，y 方向の水理条件は一様であるので2次元問題とみなすことができる (Fig. 3)．このときの解析解は Hamel (1934) によつて求められているので，まずこの解と数値解とを比較して数値計算の精度を確かめる．そしてつぎにパイプがある場合について計算を行なう．

1. パイプがないときの解析解

Fig. 3 の場合について Hamel はホドグラフ法を用い，つぎのような解を得ている．

$$\left.\begin{aligned} L &= K\int_{\lambda=b}^{\lambda=a} e^{\tau} df\left(\frac{1}{\lambda}\right) \\ h_w &= K\int_{\lambda=a}^{\lambda=\infty} e^{\tau} df\left(\frac{1}{\lambda}\right) \\ h_s &= -K\int_{\lambda=-\infty}^{\lambda=0} e^{\tau} df\left(\frac{1}{1-\lambda}\right) \\ h_e &= K\int_{\lambda=1}^{\lambda=b} e^{\tau} df\left(\frac{1}{\lambda}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

また地下水面の位置は次式で与えられる．

$$\left.\begin{aligned} x &= -K\int_{\lambda=0}^{\lambda} e^{\tau}\frac{df[\lambda]}{[1+f^2(\lambda)]^{3/2}} \\ z-h_0 &= -K\int_{\lambda=0}^{\lambda} e^{\tau}\frac{f(\lambda)df(\lambda)}{[1+f^2(\lambda)]^{3/2}} \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

ここで

$$h_0 = h_w + h_s$$

$$e^{\tau} = \sqrt{\left|\frac{\lambda-1}{\lambda(a-\lambda)(\lambda-b)}\right|}\, e^{-\frac{3}{2\pi}\int_0^1 \frac{\beta(\varepsilon)}{\varepsilon-\lambda} d\varepsilon}$$

$$\beta = 2\tan^{-1} f(\lambda)$$

$$f(\lambda) = \frac{K'(\sqrt{\lambda})}{K(\sqrt{\lambda})}$$

$$K(\mathrm{k}) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-\mathrm{k}^2 \sin^2\theta}}$$

これらの解の積分値はいずれも数値積分法によつて求められる．a と b のいくつかの値に対しては Hamel und Günther (1935), Muskat (1935) によつて，$a=\infty$ の場合については Hollingsworth and Meyer (1958) によつて計算が行なわれている程度で，計算例は少ない．

Fig. 3 の場合についても，これらの研究者が用いた方法を適用して計算を行なうが，その方法について簡単に述べる．

i) $\displaystyle\int_0^1 \frac{\beta(\varepsilon)}{\varepsilon-\lambda} d\varepsilon$ **の積分**

被積分函数の $\beta(\varepsilon)$ は積分区間内で無限大になることはないので，積分区間を42の区間にわけて，おのおのの区間で $\beta(\varepsilon)$ を直線近似した．すなわち i 区間 $(c_i \leq \varepsilon \leq c_i+1)$ では $\beta(\varepsilon) = a_i\varepsilon + b_i$ である．したがつて積分値はつぎのようになる．

$$\int_0^1 \frac{\beta(\varepsilon)}{\varepsilon-\lambda} d\varepsilon = \sum_{i=1}^{42}\int_{c_i}^{c_{i+1}} \frac{a_i\varepsilon+b_i}{\varepsilon-\lambda} d\varepsilon$$

$$= \sum_{i=1}^{42}\left[a_i(c_{i+1}-c_i) + (a_i\lambda+b_i)\ln\left|\frac{c_{i+1}-\lambda}{c_i-\lambda}\right|\right]$$

ii) 各積分の計算

(2) 式，(3) 式の積分はいずれも広義積分であるので，つぎの方法を用いて計算した．例えば L の積分の場合で示すと，積分範囲をつぎのように広げていく方法である．

$$\int_b^a = \int_{b+\varepsilon_1'}^{a-\varepsilon_1} + \int_{a-\varepsilon_1}^{a-\varepsilon_2} + \int_{a-\varepsilon_2}^{a-\varepsilon_3} + \cdots + \int_{b+\varepsilon_2'}^{b+\varepsilon_1'} + \int_{b+\varepsilon_3'}^{b+\varepsilon_2'} + \cdots$$

ここで $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \cdots, \varepsilon_1', \varepsilon_2', \varepsilon_3', \cdots$は単調に0に収束する正数の列である．

この範囲は必要な精度が得られるまで広げていく．本研究ではあらたに加えられた項が全体の値の 0.02 %以下になるまで計算をすすめた．この積分計算は積分区間の分割の仕方，$\varepsilon_1, \varepsilon_2 \cdots \varepsilon_n \cdots$ のとり方，収束の判定基準などを改善することによつてさらに精度を高めることができると考えられる．本研究で使用した計算方法の精度についてはつぎの理由から十分であると判断した．すなわちこの方法を用いて $a=10$, $b=5$ の場合について計算を行ない，既往の計算値と比較した結果を Table 1 に示すが，いずれと比較しても大きな差はない．また（3）式から得られた地下水面は（2）式による $x=0, x=L$ における地下水面の位置に収束している．

Table 1. Calculated results in the case of $a=10, b=5$.

Workers	Calculated values			
	L	h_e/L	h_w/L	h_s/L
Hamel-Günther (1935)	0.159	2.03	0.51	0.78
Muskat (1935)	0.162	1.99	0.52	0.76
Present work	0.162	1.96	0.53	0.76

したがつて Fig. 2 の場合にもこの方法を適用できると考えられ，a, b の値を求めると $a=1.462$, $b=1.000058$ が得られた．この a, b の値から求められた地下水位分布を Fig. 4 に示す．ここで $h_s/L=0.029$ である．

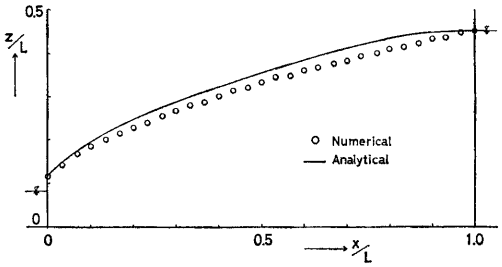

Fig. 4. Analytical and numerical distribution of the groundwater level without pipe.

2. 差分法による数値解

i) パイプがないときの地下水位分布

数値計算にはつぎの基本式と境界条件を用いた．

基本式

浸透領域内で

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad (4)$$

境界条件

AEE′A′ 上で　$h = h_w (= 25.0\ \mathrm{cm})$

EDD′E′ 上で　$h = z$

DCC′D′ 上で　$\dfrac{\partial h}{\partial n} = 0, h = z$

$\left(\dfrac{\partial h}{\partial n}\right.$は地下水面の法線方向の微分係数$\left.\right)$

BCC′B′ 上で　$h = h_e (= 135.0\ \mathrm{cm})$

ABB′A′ 上で　$\dfrac{\partial h}{\partial z} = 0$

ここで h は水頭である．

つぎに基本式を差分式でおきかえ，さらに加速係数 w を用いた緩和式，（5）式に変形する．

計算では $\Delta x = \Delta y = 10$ cm, $\Delta z = 5$ cm, $w = 1.7$ を用いた．

また格子図を Fig. 5 に示しているが，$j=2, j=12$ および $k=2$ 断面は不透水性境界である．

基本的な計算方法は岡（1971）が用いた方法とほぼ同じである．ただし本研究では浸出開始点については，近似的に $i=2$ と $i=3$ 点の地下水位を直線で結び，この延長と $i=1$ の境界との交点を求める点とした．一般にこの点を正確に求めるためには，浸出面付近では格子間かくを小さくする必要があるが，電子計算機の計算能力の制約から全領域にわたつて等間かくとしたために，このような近似的な方法をとつた．

収束については，領域内の各格子点（総点数 6000 点あまり）の $h^{n+1}_{i,j,k}$ と $h^n_{i,j,k}$ の差の絶対値の和が 25.0 以内であればよいとした．

$$h^{n+1}_{i,j,k} = h^n_{i,j,k} + w\left\{\frac{\alpha_x(h^n_{i+1,j,k}+h^{n+1}_{i-1,j,k})+\alpha_y(h^n_{i,j+1,k}+h^{n+1}_{i,j-1,k})+\alpha_z(h^n_{i,j,k+1}+h^{n+1}_{i,j,k-1})}{2(\alpha_x+\alpha_y+\alpha_z)} - h^n_{i,j,k}\right\} \qquad (5)$$

ここで $\alpha_x = 1/\Delta x^2, \alpha_y = 1/\Delta y^2, \alpha_z = 1/\Delta z^2$

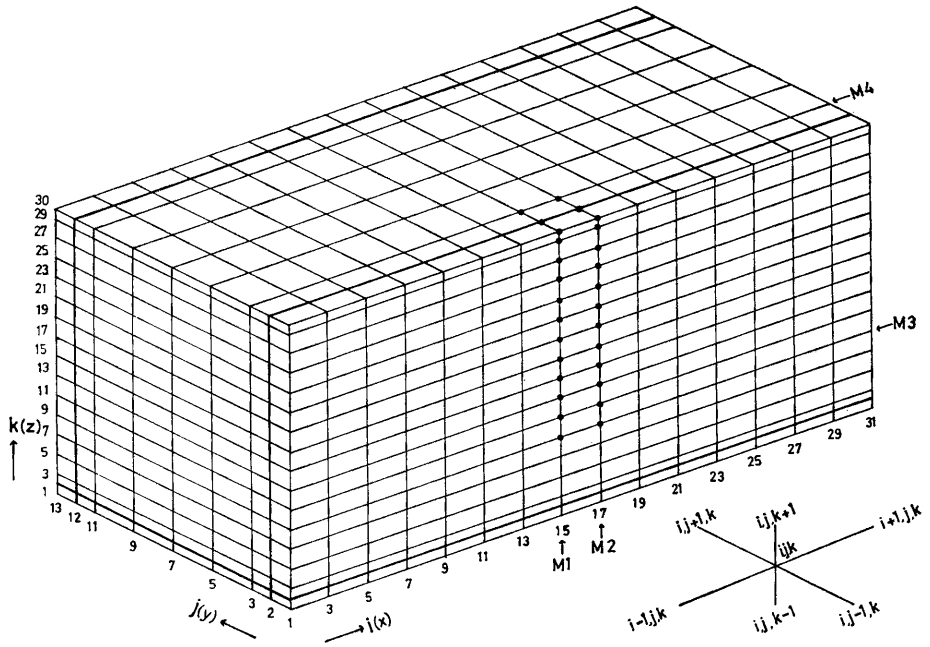

Fig. 5. Grids for the numerical solution. Grids with dots are the pervious walls of the perforated pipe.

得られた結果を Fig. 4 に示す．解析解と完全に一致はしていないが，パイプの影響を比較するために用いるのには十分な精度であると考えられる．

ii） パイプがあるときの地下水位分布

Fig. 2 に示す領域の y 方向の中央断面にパイプを設置すると，領域はパイプの位置に関して対称となるので計算は半分の領域について行なえばよい．Fig. 5 の黒丸をつけた格子点はパイプの周壁で等水頭透水性境界とする．パイプの径は M 1, M 2, M 4 によって，設置深さは M 3 で表わされる．以下では径が等しく (M 1 = 15, M 2 = 17, M 4 = 3)，設置深さが異なる (M 3 = 9 と M 3 = 16) 場合と，設置深さが等しく (M 3 = 9)，径が異なる (M 1 = 15, M 2 = 17, M 4 = 3 と M 1 = 14, M 2 = 18, M 4 = 4) 場合の地下水位の乱れの大きさを計算で求め比較する．

ここで格子点数の取り方の制約から円形のパイプは長方形のパイプでおきかえている．

またパイプ周壁における浸出面の位置はパイプ近くの地下水位を外挿して求めた．

パイプ内の水面は，Ⅱで述べたように，パイプ内への流入量とパイプ内からの流出量とが等しくなるような位置に生じるが，格子間かくがあらく，正確に水面の位置を求めることはできなかつたのでつぎの方法を用いた．まずパイプ内の水位を 90, 95, 100, 105 cm としてパイプ内への総流量Q（＝流入量－流出量）を計算する．そしてこれらの値から総流量が0になるようなパイプ内の水位を推定した (Fig. 6)．

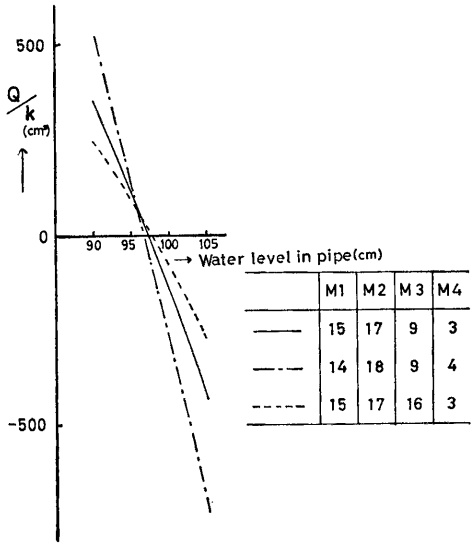

Fig. 6. Total inflow rate as a function of the water level in a pipe.

いずれの場合もパイプ内水位が約 97.5 cm のときに総流量は0となつているとみなすことができるの

で，このときの水位を求めるパイプ内水位とした．厳密にはパイプの径，設置深さによつて異なつたパイプ内水位が生じると考えられ，Fig. 6 においても総流量が0となるパイプ内水位にはわずかに差がみられるが，明確な傾向を把握することはできない．

また領域内の水頭分布はパイプ内水位が 95 cm と 100 cm のときの水頭分布の平均の分布から求めた．

パイプがないときの地下水位に対するパイプがあるときの地下水位の変化量を Fig. 7 に示す．Fig. 8 はパイプの中心を通る断面，すなわち $j=2$ 断面でのパイプによる地下水位の変化量を，Fig. 9 は M 1 = 14, M 2 = 18, M 3 = 9, M 4 = 4 の場合のパイプからの距離による地下水位の変化量を示している．

また Fig. 10 では M 1 = 15, M 2 = 17, M 3 = 9, M 4 = 3 の場合の水頭分布，地下水位分布をパイプがない場合の分布と比較している．

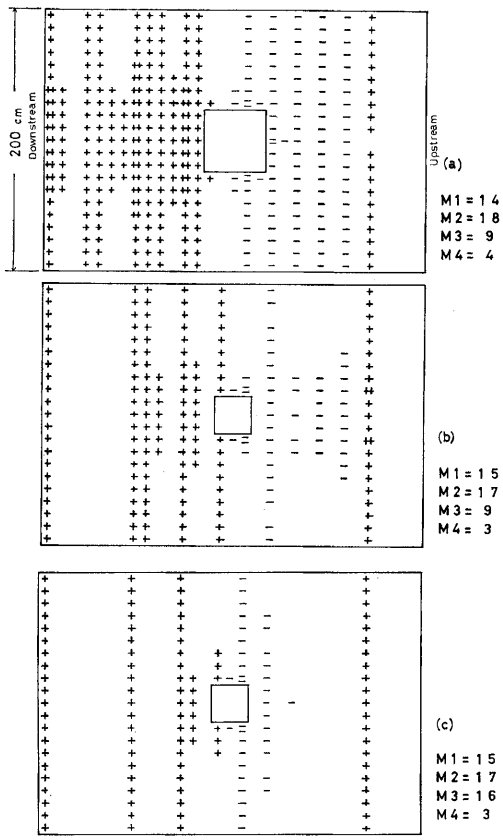

Fig. 7. Variation of groundwater level due to the influence of flow in a pipe. The increment of groundwater level is presented by D. ＋, 5.0 cm < D; +, 2.5 cm ≦ D < 5.0 cm; blank, −2.5 cm < D < 2.5 cm; −, −5.0 cm < D ≦ −2.5 cm; =, D ≦ −5.0 cm.

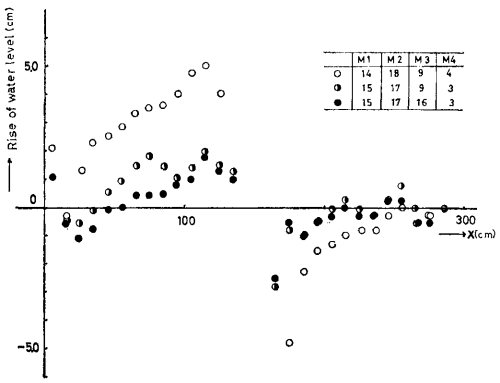

Fig. 8. Rise of the groundwater level due to the pipe in the $j=2$ section.

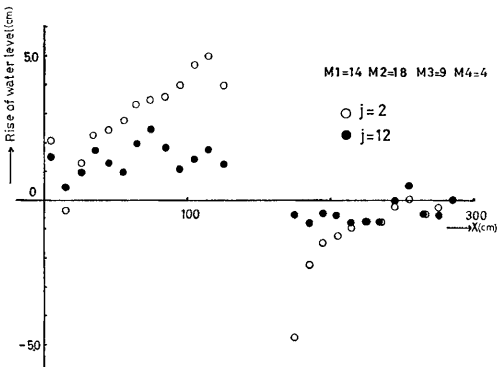

Fig. 9. Rise of the groundwater level due to the pipe in the $j=2$ and $j=12$ sections.

Ⅳ. 考察およびまとめ

計算結果をみると Fig. 7 において上流側でも地下水位の上昇がみられること，および Figs. 8, 9 の上昇量にばらつきがあることなどから数値計算の誤差が生じていると考えられる．しかしこれらの計算値から Fig. 10 のようななめらかな曲線を得るのに際して大きな困難はないので，計算結果から定性的な傾向を把握できると考えられる．

Figs. 7, 8 から，パイプの設置深さが等しいときは (a, b), (a) の場合のようにパイプの径が大きい程地下水位分布の乱れは大きく，径が等しいときは (b, c), (b) の場合のように設置深さが深い程乱れは大きいことがわかる．また地下水位はパイプの上流側では低下し，下流側では上昇する傾向がみられる．その変動の大きさは下流側の方が大きいようである．

パイプからの距離と乱れの関係 (Fig. 9) については，パイプから遠ざかるにしたがつて乱れは小さくなり，計算誤差を伴つているために正確に判定はできな

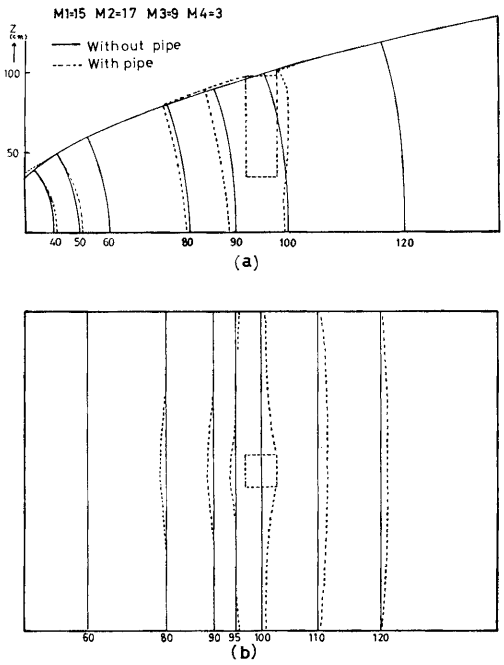

Fig. 10. Groundwater head and level distribution with and without pipe. (a) head distribution; (b) water level distribution.

いが，Fig. 7 (c) の場合，パイプからもつとも離れた地点での乱れはほとんどみられない．実際に使用されるパイプの径はもつと小さいので乱れはさらに小さくなる．

いずれの場合もパイプ内水位（約 97.5 cm）はもとの地下水位よりパイプ中央の位置で 2.5 cm 低下している．またパイプによる地下水位の変動は径がもつとも大きく，設置深さがもつとも深い場合（M 1 = 14, M 2 = 18, M 3 = 9, M 4 = 4）で ±5 cm 程度である．

パイプによる水頭分布の乱れについても同様の傾向がみられる．

地下水面の勾配の影響については計算は行なわなかつたが，Ⅱで述べたパイプ内に水面が生じる機構を考慮することによつて傾向を把握することができる．すなわちパイプ付近の地下水面の勾配が大きくなり等水頭線が水平に近づくと，パイプのストレーナ部分の上端と下端の位置の水頭差は大きくなり，もとの地下水位からのパイプ内水位の低下量の絶対値は大きくなる．したがつて付近の地下水位の乱れも大きくなる．

このように，パイプによる地下水位の乱れは，パイプの設置深さが深く地下水面下のストレーナ部分が長い程，パイプの径が大きい程そして地下水面の勾配が大きい程大きくなる．

Fig. 2 の場合の寸法を 1/10 にするとパイプの径は約 2～4 cm になり実際に水田の地下水位測定に使用されるパイプの径にほぼ等しくなる．このときの地下水位の変化量は最大 5 mm, パイプ内水位のもとの地下水位からの低下量は 2.5 mm, 程度となるが，水田の暗きょ近くの水面勾配は Fig. 2 の場合の平均勾配 0.367 $\left(=\frac{135-25}{300}\right)$ よりも大きく，またパイプの設置深さもさらに深い場合もあり，このときは低下量はさらに大きくなる．たん水した水田の暗きょ近くのパイプ内水位分布が水平にならない現象については千葉 (1968) によつて述べられている．また Richards *et al.* (1973) はテンシオメーターによる測定結果にもとづき地下水位と観測井内の水位とが一致しないことを実験的に確かめている．

暗きょ真上の地下水位が暗きょ周壁の上端以下に低下しているときと暗きょの上方にあるときとでは暗きょ排水量の解析方法が異なるので暗きょ近くの地下水位分布を正確に求める必要がある．また地下水面が急勾配となるアースダムのコア，揚水井戸の近くなどで地下水位を測定するとき不必要にパイプの径を大きくしたり既存の大口径の井戸を利用して測定したりするとき，またパイプの設置深さが深すぎる場合などでは測定誤差が生じやすい．

以上の考察をまとめるとつぎのようになる．

i) パイプの径は小さく，また地下水面下のストレーナの部分は短い程地下水面の乱れは小さい．

ii) パイプ近くで鉛直下方向の流れの成分が大きいときすなわち地下水面勾配が大きいとき，パイプ内水位のもとの地下水位からの低下量は大きい．

iii) パイプによる乱れは上流側で地下水位の低下，下流側では上昇となつてあらわれるが，その変化の程度は下流側の方が大きい．

iv) 正確な影響範囲を知るためには，さらに格子間かくを小さくする必要がある．

V. 要　　約

パイプによる地下水位測定のとき，地下水面が地下に存在しない場合もパイプ内に水面が生じるばかりでなく，たとえ地下水面が存在する場合でも地下水流があるときはパイプ内の水の流れによつて乱された地下水流に対応した，自然の地下水位とは異なる位置にパイプ内に水面が生じる．

パイプ内に水面が形成される機構に関する考え方にもとづいて3次元自由面地下水流の場合におけるパイ

プによる地下水流，地下水位分布の乱れの大きさについて解析した．この結果パイプの径が大きく，設置深さが深くそして地下水面の勾配が大きい程乱れは大きいこと，パイプによる乱れは上流側で地下水位の低下，下流側では上昇となつてあらわれることがわかつた．

文　献

千葉 豪 1968 泥炭地における排水と地耐力．農土誌，**36**: 42-46

Hamel, G. 1934 Über Grundwasserströmung. *Z. Angew. Math. Mech.*, **14**: 129-157

Hamel, G. und E. Günther 1935 Numerische Durchrechnung zu der Abhandlung über Grundwasserströmung. *Z. Angew. Math. Mech.*, **15**: 255-265

Hollingsworth, B. J. and H. I. Meyer 1958 Two dimensional gravity drainage profiles. *Trans. Amer. Geophys. Union*, **39**: 689-696

Kirkham, D 1947 Studies of hillside seepage in the Iowan drift area. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **12**: 73-80

三好 洋 1973 水田および水田輪換畑の地下水位と湿害対策 1. 水田および転換畑の地下水位の変動．農業技術，**28**: 293-296

Muskat, M. 1935 The seepage of water through dams with vertical faces. *Physics*, **6**: 402-415

Myers, L. E. and C. H. M. van Bavel 1963 Measurement and evaluation of water table elevations. *In* "Proc. 5th. Congr. ICID, Tokyo," ICID, New Delhi, pp. 17. 109-17. 119

長堀金造・三野 徹 1966 地下水位測定用パイプ内水位について．第23回農土学会京都支部大会講演要旨，98-100

中川昭一郎 1964 湿田の乾田化に伴なう透水条件の変化．農土試報告，**2**: 19-85

岡 太郎 1971 自由水面を有する浸透流の三次元解析方法とその考察・河川構造物の浸透問題 (3)．京大防災研年報，**14B**: 167-178

Richards, S. J., L. S. Willardson, S. Davis and J. R. Spencer 1973 Tensiometer use in shallow ground-water studies. *Proc. Amer. Soc. Civil. Eng.*, **99**(IR4): 457-464

杉山英郎・朝倉 懇・菅原恒雄 1969 屏風山地域における地下水位の変化と減水深の関連について．農土誌，**37**: 3-7

Talsma, T. 1963 Method of measuring water-table depth and pressure levels. *In* "Proc. 5th. Congr. ICID, Tokyo", ICID, New Delhi, pp. 17. 1-17. 11

田中 明 1974 被圧地下水帯における浸出面をもつ浸透流について．農土論集，51: 34-40

田中 明・田辺邦美 1972 水田に設置された多孔性パイプ内の水位について．九大農学芸誌，**26**: 251-258

Summary

In measuring the groundwater level with a perforated pipe, the water surface may be formed in the pipe even if the groundwater table does not exist under the ground. In the case with the existence of the groundwater table, the groundwater flow is disturbed due to the flow in the pipe. And inversely the water level in the pipe belongs to this disturbed groundwater flow. Thus, there is a possibility that the water level in the pipe may not be regarded as the true level of groundwater. In this paper, the variations of the flow and level of the groundwater were analyzed in the case of a perforated pipe which is installed in a three-dimensional groundwater flow.

At first, the physical meaning of the water level in a perforated pipe installed in the paddy field was studied and it was confirmed that the water surface in the pipe is located at the level where the inflow rate into the pipe equals to the outflow rate out of it. This mechanism may be valid for the pipe installed in various types of groundwater flow.

In consideration of this mechanism, the influences of the radius and length of the pipe upon the variations of the groundwater flow were investigated. It was concluded that the variations become greater with the larger radius of the pipe, with the deeper depth of the pipe below the groundwater and in the case of the steeper slope of the groundwater table.