

湖面水位の変動にともなう周辺水田 浸透量の増減に関する研究

長 堀 金 造

Study on the Increase and Decrease of the Percolated Water
Quantity in the Paddy Fields around the Lake due to
the Variation of Water Level of the Lake

Kinzo NAGAHORI

The author have considered and examined the relations between the difference of water level of the lake and the percolated water quantity in the paddy fields around the lake increased by the variation, and between the increased percolated water quantity and the distance from the lake. The results obtained are as follows.

1) If the difference of water level of the lake is h_0 m, the percolation intensity q of the paddy fields of x m from the lake can be expressed as below.

$$q = -Fh_0e^{-ax}$$

2) In the layer of the semi-permeable layer, the smaller the percolation coefficient k_1 of the soil is, the less the percolation intensity is, but the influence by the percolated water quantity increased by the change of water level extends to far distant fields from the lake.

On the other hand when k_1 is large percolation coefficient, the percolation intensity of the lakeside is large, but the percolation intensity is inclined to decrease as the distance from the lake increases. For an instance, when the difference of water level was 1 m, the point of the percolation intensity $q=10$ mm/day was 21 m from the lake in case of the percolation coefficient $k_1=1 \times 10^{-4}$ cm/sec of d_1 of semipermeable layer, and 28 m in case of $k_1=5 \times 10^{-5}$ cm/sec.

3) Furthermore, the larger the difference of water level is, and the larger k_1 is, the greater the percolation intensity becomes. For an instance, if the difference of water level of the lake, h_0 was 2m, 3m, 4m, 5m, the distance influenced by the difference of water level was 41m, 48m, 53m and 57m respectively on the basis of the percolation intensity $q=10$ mm/day. Similarly in case that coefficient of permeability $K_1=5 \times 10^{-5}$ cm/sec in the layer d_1 , the influenced distance from the lake was 40m, 50m, 57m and 62m respectively. Moreover, if the coefficient of permeability k_1 is 1×10^{-5} cm/sec in the later d_1 , as the value of coefficient of permeability is small when $h_0=1$ m and 2 m, the percolation intensity was influenced less than $q=10$ mm/day. Therefore, when the difference of water level, h_0 was 3m, 4m, and 5m, the influenced distance from the lake was 21m, 37m, and 46m respectively.

4) From the above results, it will be said that in the paddy fields of the optimum quantity of percolated water, if the difference of water level is less than about 5m, the influenced distance is within 60m. Therefore, if d_1 , d_2 layers and k_1 , k_2 are measured, and if the percolation intensity q is fixed properly, the increased percolated water quantity due to the variation of water level, h_0 and the influenced distance from the lakeside will be calculated.

I. 緒 言

従来、農業用水源に主として使用していた湖沼が最近の水需用の緊迫にともない、湖沼水位を人為的にコントロールして無効放流を抑制し、新に利用可能水量を増加させる計画が行なわれている。コントロールされる水位変動が大きければ大きいほど、ある限度までは利用可能水量は増加されるが、しかし一方ではこのような水位変動により周辺農地に好ましくない影響を引き起しているようである。例えば、湖面水位低下によって周辺水田の浸透量が急激に増加した事例によっても認められるし、さらには湖岸近傍の水田はキレツの異状な発達によって湖面水位回復後でもそれらの水管理の面で農民からの苦情が強くおきたり、場合によっては補償対象にとの声もまきにおよんでいる。かかる問題解決への手掛りとして、まず、具体的には湖面水位の低下に対応する周辺水田からの浸透量がどれほど増加するのか、あるいはまた、変動する湖面の水位差に対応して湖岸からどの程度の距離まで水位差による浸透量の増加があるのか、これらの点を明らかにすることを本研究のねらいとした。

湖周辺の地層は沖積層のようであるが、一般に複雑な土層構造をもっており、したがって、そこに存在する水田からの浸透水の経路も複雑でその一般的特性が十分把握されているとはいえない。

そこで、本論文においては、湖周辺水田土層をモデル化した二層構造と考へ、基礎式を誘導すると共に、それを一つの事例に適用して、湖面水位の低下に対応する周辺水田浸透量の増加の程度とその影響範囲について検討と考察を行なったものである。

II. 外水位の変動にともなう浸透強度分布に関する基礎式の誘導

湖面など外水位が周辺水田の浸透に与える影響を調べるには複雑な境界条件のもとに浸透水運動を三次元的に解析するのがのぞましい。

特に複雑な境界で成層分化しているような水田の場合の解析は不可能であり数値解によるほかはない。しかし、三次元的に数値解を求めることは非常に困難であり、また、現在の透水係数の測定に対する精度から考えてもそれほど厳密な解析は必要でない。故に三次元の問題を適当な仮定のもとに水平面の二次元的運動にして基礎式を導くことにする。

一般に、湖面水位の変動は周辺地域の地下水位に影響を及ぼし¹⁾、地下水位の増減が水田浸透量の増減に関与していることはすでに報告され²⁾てきた。

しかし、かんがい期において、地下水位が明瞭にあらわれない閉鎖浸透域内の水田では、排水路水位が土壤中の動水勾配に関係し、浸透量を変化させる要因になる³⁾。本研究はかような場合の条件で行なわれる浸透の場をあつかっている。そこでまず、式誘導の前提条件として周辺水田は半透水層と透水層の二層に分化した成層構造をもち、半透水層が上層にあるものとする。これは一般の熟田といわれる水田においてよくみられる成層状態⁴⁾である。また、浸透は閉鎖浸透⁵⁾をなすものとし、半透水層（以下上層という）においては、浸透水は鉛直降下浸透をなし、透水層（以下下層という）においては、不圧地下水の流れにおいて、DUPUIT-FORCHHEIMERが仮定したように準平面流をなすものとする。この仮定は上層における水平方向の流れを無視し、下層においては鉛直方向の流れを無視している。また、一般に帯水層の圧縮を考慮に入れなければならないが、これによる影響は上部の浸透に比し、十分小さいので無視できると考へ、境界面のポテンシャルは等しいとする。

これらの仮定で模型図を描くと図-1のようになる。

基礎式の誘導

以下使用する記号を次のように定める。

- k_1 : 上層の透水係数 d_1 : 上層の厚さ k_2 : 下層の透水係数
- d_2 : 下層の厚さ $F_1 = k_1/d_1$: 上層の透水性 $F_2 = k_2 \times d_2$: 下層の透水性
- ϕ : 任意地点の下層のポテンシャル

Fig. 1. Model of Layered Soils

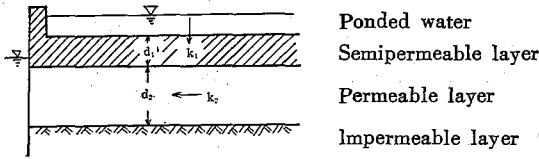
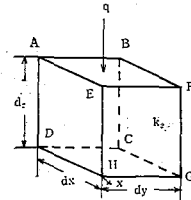


Fig. 2. Element on a fluid Particle



いま、図-2のような2辺が dx, dy であるような微小な下層を考える。 q は単位面積の上層を通り浸透する浸透量であり、いわゆる浸透強度を示すものである。

はじめに x 軸方向の流れを考える。 A, B, C, D の流入する浸透量は Darcy 法則により

$$-k_2 d_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot dy = -F_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot dy \dots \dots \dots (1)$$

E, F, G, H より流出する量は同様にして

$$- \left\{ F_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(F_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx \right\} dy \dots \dots \dots (2)$$

したがって、 x 方向の流れにより A, B, C, D, E, F, G, H 内に貯溜される水量は、式 (1), (2) の差をとって

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(F_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dy \cdot dx \dots \dots \dots (3)$$

y 軸方向の流れも同様に考えると

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(F_2 \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx \cdot dy \dots \dots \dots (4)$$

流量は連続しなければならないから

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(F_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dy \cdot dx + \frac{\partial}{\partial y} \left(F_2 \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx \cdot dy + q dx \cdot dy &= 0 \\ \therefore \frac{\partial}{\partial x} \left(F_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(F_2 \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + q &= 0 \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

いま、仮定より、上層内では鉛直降下浸透をなしているから Darcy 法則をそのままあてはめると q は次のように表わされる。

$$q = \frac{k_1}{d_1} (\phi_0 - \phi) = F_1 (\phi_0 - \phi) \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 ϕ_0 は上層の表面にかかるポテンシャルである。(6)式を(5)式に代入すると次の微分方程式が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(F_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(F_2 \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + F_1 (\phi_0 - \phi) = 0 \dots \dots \dots (7)$$

(7)式を定められた境界条件のもとで解けば下層における浸透水の流動状況が求まる。そして(7)式で解いたφを(6)式に代入すると任意地点の浸透強度が求まることになる。一般に(7)式は解析的手法では解かれないので数値解法を用いるとよい。

いま、条件をさらに単純化して下層の透水係数および厚さを一定とするとF₂は常数となり(7)式は次のように変形される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{F_1}{F_2} (\phi_0 - \phi) = 0 \dots\dots\dots(7)'$$

いま、ポテンシャルを水田のタン水面から考え

$$\phi' = \phi - \phi_0 \text{ をおくと} \dots\dots\dots(8)$$

(7)式は

$$\frac{\partial^2 \phi'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi'}{\partial y^2} - a^2 \phi' = 0 \dots\dots\dots(9)$$

ここで $a^2 = F_1/F_2 = (k_1/k_2) \times [1/(d_1 \times d_2)]$

この(9)式がタン水田の浸透量をもとめる基礎式である。

いま、簡単化のためx軸方向のみの一次元流を取扱うと、

$$\frac{\partial^2 \phi'}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 \phi'}{\partial x^2} = \frac{d^2 \phi'}{dx^2} \dots\dots\dots(10)$$

故に(9)式は、

$$\frac{d^2 \phi'}{dx^2} - a^2 \phi' = 0 \dots\dots\dots(11)$$

上の微分方程式を解くと、φ'は次のようになる。

$$\phi' = Ae^{ax} + Be^{-ax} \dots\dots\dots(12)$$

ここで、次のような境界条件を与える。

- ① $x \rightarrow \infty$ のとき $\phi' = 0$
- ② $x = 0$ のとき $\phi' = h_0$

h_0 : 水田のタン水面から湖面水位 (外水位面) までの差

したがって、(12)式は①より $A = 0$

②より $B = h_0$

故に(12)式は次のようになる。

$$\phi' = h_0 e^{-ax} \dots\dots\dots(13)$$

これが周辺水田における湖岸からx地点での外水位差が $h_0 m$ なる変化にともなうポテンシャルを表している。

(13)式を(6)式に代入するため

$$\phi = \phi' + \phi_0$$

$$\therefore \phi = \phi_0 + h_0 e^{-ax} \dots\dots\dots(14)$$

(14)式を(6)式に代入すると

$$q = F_1 \{ \phi_0 - (\phi_0 + h_0 e^{-ax}) \} = -F_1 h_0 e^{-ax} \dots\dots\dots(15)$$

この(15)式は湖岸から周辺水田のx地点における外水位差が $h_0 m$ なる場合の浸透強度を表わしている。

Ⅲ. 外水位の変動が湖周辺水田浸透量におよぼす影響範囲について

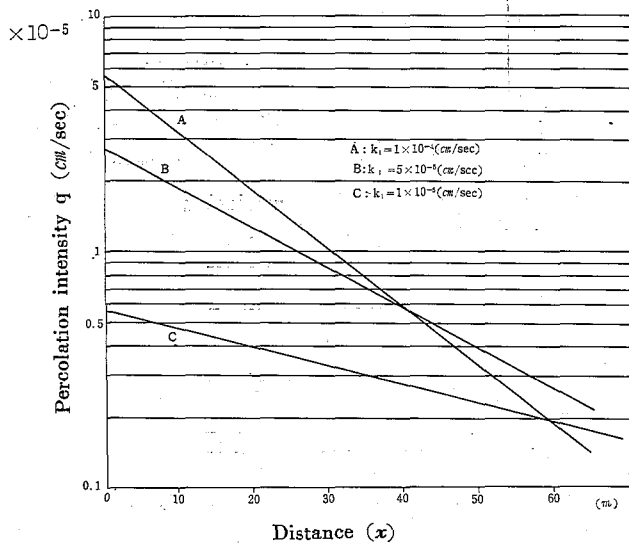
(15)式でそれぞれの諸量を代入して、検討してみる。数値の大部分はY湖の周辺水田の立地条件を考慮して使用したものである。

まず $q = -F_1 h_0 e^{-ax}$ において F_1 と a の決定であるが、変動量 h_0 を $1m$ について考えることにし、 F_1 の決定には k_1 を湖周辺土性の代表例として次の3種類をとった。すなわち上層 d_1 の(A)土性として、 $k_1 = 1 \times 10^{-4} cm/sec$ 、(B)土性として $k_1 = 5 \times 10^{-5} (cm/sec)$ 、(C)土柱として $k_1 = 1 \times 10^{-5} (cm/sec)$ のそれぞれの透水係数を採用し、土層の厚さ d_1, d_2 はボーリングした土柱図より判定して $180cm, 120cm$ とした。

さらに d_2 層の実測透水係数は $k_2 = 1.47 \times 10^{-2} cm/sec$ であったのでそれを採用した。

以上からまず、田面タン水面と湖面水位差が $h_0 = 1m$ の場合の影響範囲をしるため、 x は湖境界線より周辺水田方向に $0, 1m, 2m, 5m, 20m, 100m$ のそれぞれの地点での浸透強度分布 q をもとめてみた。その結果を示したのが図-3である。

Fig. 3. Difference of percolation intensity corresponding with the difference of percolation coefficient on the case of $h_0 = 1m$

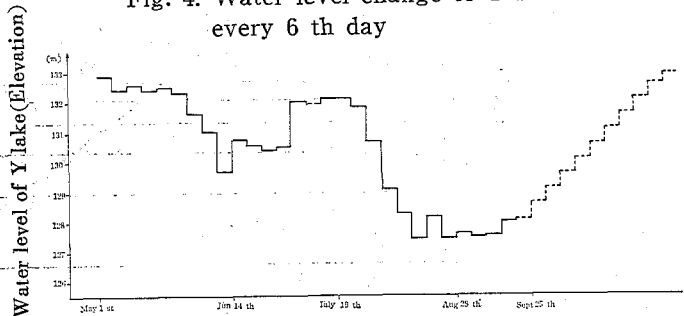


この場合の周辺水田の田面タン水深は $10cm$ としている。このように各5日ごとの水位をもとめて、それぞれを h_0 とする。また、湖境界線より距離 $1m, 2m, 5m, 10m, 20m, 50m, 100m$ について計算した。5日ごとの水位変化に対応する浸透量の増減関係を示

この結果から、透水係数の大きい土性は湖岸側での浸透強度が大きく、周辺水田が湖境界線から遠ざかるにしたがって浸透強度の減少割合が大きくなり、反対に透水係数の小さい土性の場合は浸透強度そのものは小さいが湖岸より遠方まで水位低下による影響があることがわかった。

そこで、実態に則した水位変化とそれによる影響をみるため、特にY湖の基準年の水位変化を5日ごとに整理して図-4に示したが、このとき常時満水面標高 $132.80m$ から潮水面が低下変動した場合の浸透量の増加量について検討をおこなった。

Fig. 4. Water level change of Y lake on every 6 th day



せば図-5(a)(b)の通りである。

さらに、このY湖の水位変動をみると最大5m位と考えられるのでその間の湖面水位変動が常時満水面から1m, 2m, 3m, 4m, 5mなど変化した場合についても検討した。それらの結果を示せば図-6(a)(b)(c)の通りである。

以上の諸結果から、許容浸透量を規定すれば、土性ごとに各水位変動に対応する影響範囲が推定されることになる。いま、許容浸透量を5mm/dayとするならば、湖水位低下5mになったとき、その影響する湖岸からの距離は(A) $k_1 = 1 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ の土性では68m

(B) の土性では78m, (C) の土性では86mの値を得た。また、湖面水位が1m低下した場合、上層 d_1 の透水係数が $k_1 = 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ の場合、今度は浸透強度を $q = 10 \text{ mm/day}$ になる地点は、湖岸より21m, 同じく d_1 層で

Fig. 5. Difference of Percolation quantity Corresponding with change of water level

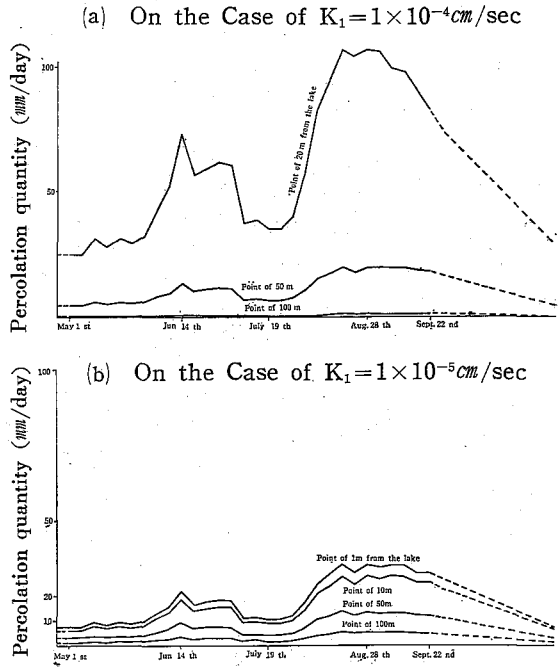


Fig. 6. Relation between the distance and the percolation quantity corresponding with water level change

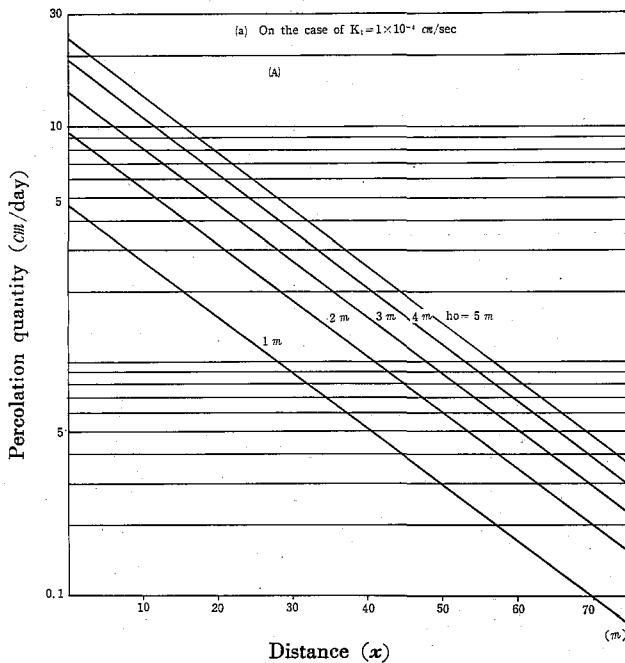
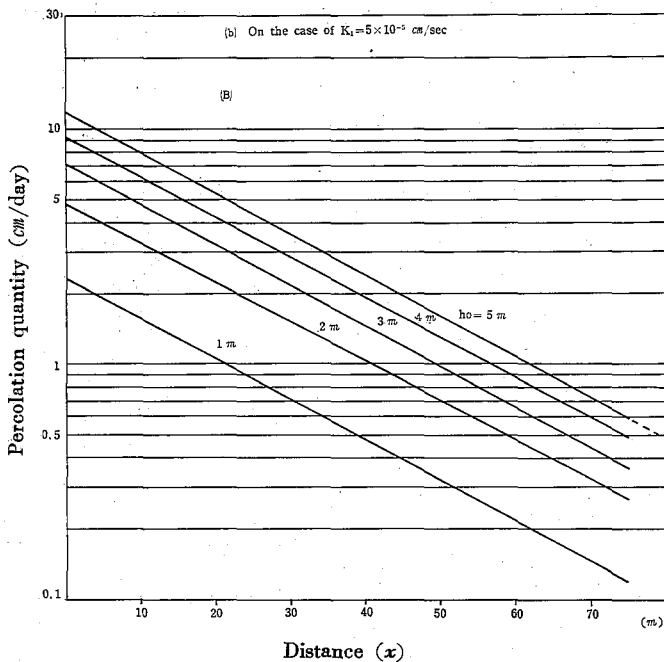
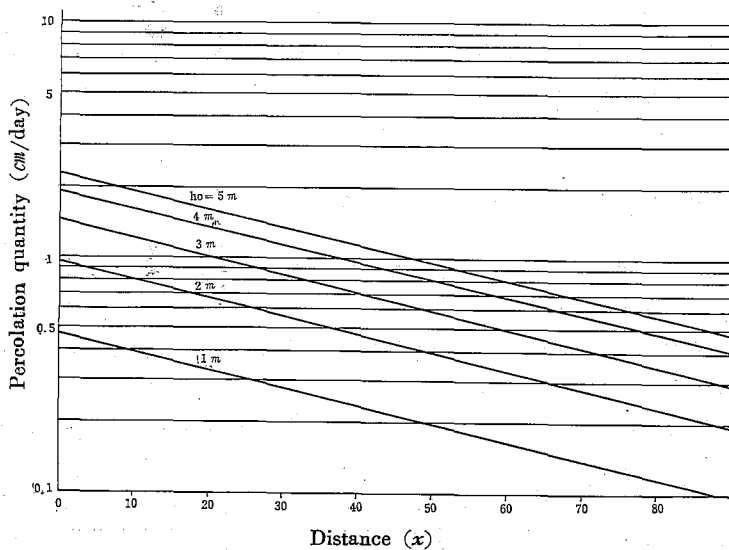


Fig. 6. Relation between the distance and the percolation quantity corresponding with water level change



(c) On the Case of $K_1=1 \times 10^{-5}$ cm/sec



透水係数が $k_1=5.0 \times 10^{-5}$ cm/sec の土性であれば $28m$ となる。

次に d_1 層の透水係数 $k_1=1 \times 10^{-4}$ cm/sec の場合湖面水位が $2m, 3m, 4m, 5m$ 低下した場合については、浸透強度 $q=10$ mm/day を一応の判定基準にした場合にそれぞれの h_0 に対応する湖岸からの距離は $41m, 48m, 53m, 57m$ である。

同様に d_1 層の透水係数 $k_1=5 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ の場合には湖岸からの影響距離は 40m , 50m , 57m , 62m である。

以上から一般の適正浸透量といわれる水田でしかも水位変動を 5m 位と考えるとその影響距離はおよそ 60m 位までと考えられる。

したがって、湖面水位低下が 5m より小さく、許容浸透量を若干大きくとるならば湖水位低下による影響距離はさらに小さくなるのがわかる。

IV. 摘 要

水資源の有効利用を計る一環として、従来農業用水源としてのみ利用していた湖沼もいろいろな型で多目的な水利用がなされるようになり、従来よりも急激な湖面水位の変動がくり返されるようになってきているものが多い。その結果、湖面水位の低下により周辺水田の浸透量が増加することになり、水管理の面から種々の問題がひきおこされるようになった。これらの関係を明らかにするにはまず、周辺水田土層構成などを適確に把握することが大切である。ところが、一般には土層構成は複雑であるから厳密な解析は困難である。そこで第一段階として、単純化した二層構造モデルを設定して、上層を半透水性層（作土層）と下層を良透水性層（心土層）との条件によって基礎式を誘導し、誘導した基礎式に一事例として、実測したいくつかの数値を入れて、それによって湖水位低下量と周辺水田の増加浸透量との関係ならびに水位低下によってうける増加浸透量の影響する湖岸からの距離などについて検討と考察を行なった。それらの結果について示せば次のように要約される。

1) 湖面水位差 $h_0\text{m}$ である場合、周辺水田の湖岸 $x\text{m}$ 、離れた地点における浸透強度 q は次のように誘導される。

$$q = -F_1 h_0 e^{-ax}$$

2) 上層 d_1 のうち、透水係数 k_1 の小さい土性ほど浸透強度は小さいが湖面低下による浸透量増加の影響は湖岸から遠方までおよぶことがわかる。逆に透水性 k_1 の大きい土性の場合には、湖岸での浸透強度の減少する率が高い。

例えば湖面水位が 1m 低下した場合、浸透強度 $q=10\text{mm/day}$ の地点は湖岸より、上層 d_1 の透水係数が $k_1=1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ の場合には 21m 同じく $k_1=5 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ の場合には 28m であった。

3) また、湖面水位差が大きくなればなるほど、また k_1 の大きいほど浸透強度が大きくなる。例えば d_1 層の浸透係数が $k_1=1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ の場合には、湖面水位差 $h_0=2\text{m}$, 3m , 4m , 5m のそれぞれの場合について浸透強度 $q=10\text{mm/day}$ を一応の判定基準にした場合、それぞれの h_0 に対する湖岸からの影響距離は 41m , 48m , 53m , 57m であった。

同様に d_1 層の透水係数 $k_1=5 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ の場合については、湖岸からの影響距離は 40m , 50m , 57m , 62m であった。

さらに d_1 層の透水係数 $k_1=1 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ の場合には、 $h_0=1\text{m}$, 2m の場合には透水係数そのものが小さいので $q=10\text{mm/day}$ 以下で変化しているので、水位変動差 h_0 を 3m , 4m , 5m のそれぞれの場合について湖岸からの影響距離を検討してみると 21m , 37m , 46m であった。

4) 以上から一般の適正浸透量といわれる水田でしかも水位変動 5m 位と考えるとその影響距離はおよそ 60m 位までと考えられる。

従って、 d_1, d_2 層 k_1, k_2 を実測し、許容浸透強度 q を任意に規定すれば、湖面水位差 h_0 に対応する増加浸透量と湖岸からの影響距離が推定できる。これらについては、今後、実態調査研究によってさらに実証的に検討していきたいと考えている。

おわりに本研究を遂行するにあたり、京大富士岡義一教授には有益な助言をいただいた衷心より深謝致します。また、三野徹氏には資料の整理、解析に御協力を得た、記して謝意を表する。

引用文献

- 1) DAVID K. TADD (1959) *Grand Water Hydrology*, 166.
- 2) 大島一志 (1956) 地下水位の変化に基く水田用水量の相対的増減関係とその変動に関する研究 農土研 21 No. 1; 21 No. 6.
- 3) 富士岡・長堀. (1965) 地下水位の変動が水田浸透量に及ぼす影響について (II) 農土学会講演要旨, 85.
- 4) 前川章 (1965) 半被圧浸透とみなしうる水田地下水の動態について 農土論 12. 15.
- 5) 山崎不二夫 (1958) 成層土壌の降下浸透に関する研究 研究の資料と記録第6集.